ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

# РАДИАТОРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА

## ОСТ4.012.001

Редакция 1-77

Издание официальное

1978

УДК 621.382-714.001.24 Группа Э02

ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

РАДИАТОРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Методы расчета

ОСТ4.012.001
Редакция I-77
Взамен НГО.072.000, редакция I-65 и ОСТ4 ГО.012.003, редакция I-69

Директивным письмом организации от 21 декабря 1977 г. № 17-42/6/501 срок введения установлен с I января 1979 г.

Настоящий стандарт устанавливает методы расчета радиаторов ребристых и штыревых односторонних и двусторонних, а также пластинчатых, предназначенных для охлаждения полупроводниковых приборов.

В стандарте представлены чертежи по выбору нормализованных радиаторов различных типоразмеров.

Выбор нормализованных ребристых и пластинчатых радиаторов установленных типоразмеров проводится в соответствии с ОСТ4.865.002 или ОСТ4 ГО.865.000.

## I. ТЕМПЕРАТУРА ПЕРЕХОДА И ДОПУСТИМОЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАДИАТОРОВ

I.I. Радиаторы, приведенные на черт.I-3, предназначены для снижения температуры полупроводниковых приборов (ППП). Присоединение радиатора к ППП увеличивает площадь теплоотдачи ППП. В этом случае часть теплового потока рассеивается с корпуса ППП, остальная часть через контактную поверхность передается на радиатор и рассеивается в окружающую среду.

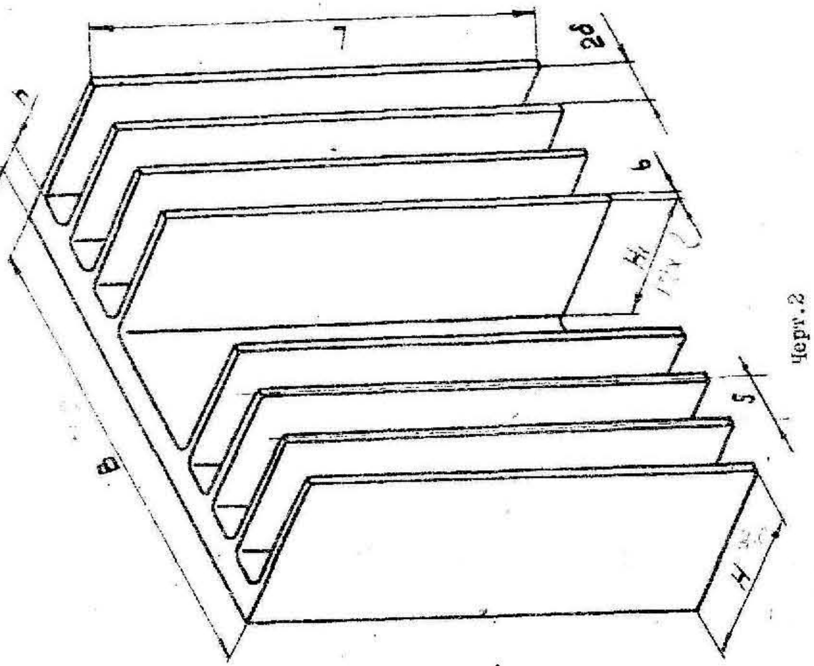
I.2. Температура перехода ППП, установленного на радиаторе, определяется из выражения:

$$t_{пер} = t_c + \Delta t_{p\,max} + \Delta t_к + \Delta t_{пк}$$

или

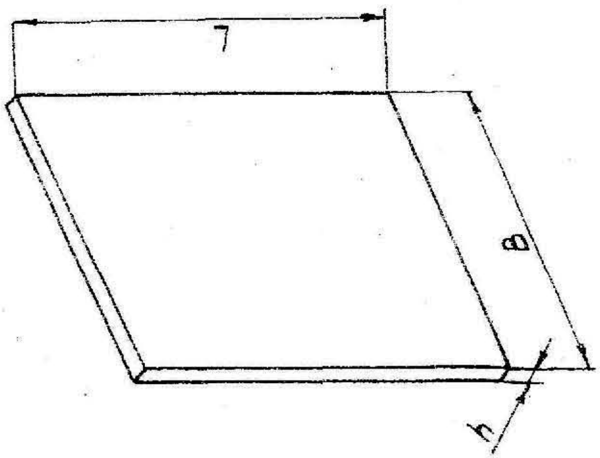
$$t_{пер} = t_c + \Delta t_{p\,max} + \Delta t_{пт}. \qquad (I)$$

Издание официальное ГР 8057714 от 06.01.78 Перепечатка воспрещена



Радиатор ребристый

Черт.2

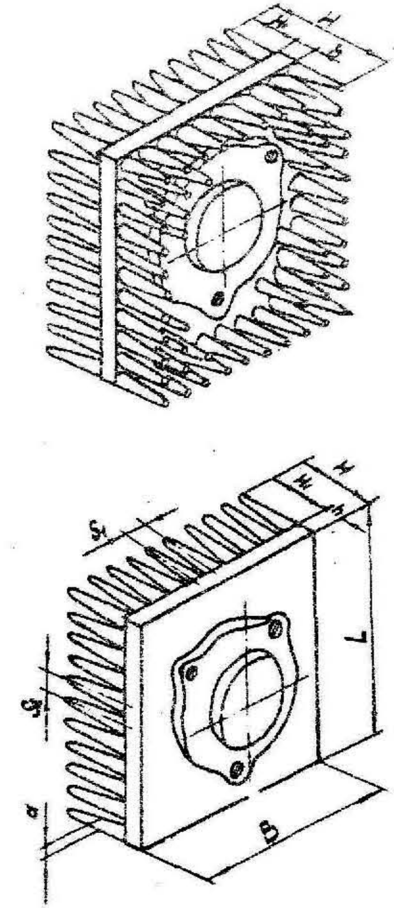


Радиатор пластинчатый

Черт.1



Радиатор штыревой



Черт.3

Учитывая, что

$$\Delta t_{p\,max} = \frac{P_p R_p}{\theta_p}\ ;\ \Delta t_{к} = P_{ппп} R_{к}\ ;\ \Delta t_{пк} = P_{ппп} R_{к}\ , \qquad (2)$$

формула (1) принимает вид

$$t_{пер} = t_c + \frac{P_p R_p}{\bar{\theta}_p} + P_{ппп} R_к + P_{ппп} R_{пк};\qquad (3)$$

$$t_{пер} = t_c + \frac{P_p R_p}{\bar{\theta}_p} + P_{ппп} R_{пт}$$

Перегрев радиатора определяется с учетом неравномерности его температурного поля. Усредненные данные неравномерности температурного поля по результатам решения системы дифференциальных уравнений (справочное приложение 1) представлены на черт.4–6.

В случае установки на радиаторе одного ППП

$$P_p = P_{ппп}\qquad (4)$$

В случае установки на радиаторе $n$ ППП

$$P_p = \sum_{i=1}^{n} P_{ппп_i}\qquad (5)$$

Таким образом, температура перехода ППП зависит от теплового сопротивления контакта, теплового сопротивления радиатора, рассеиваемой мощности и температуры окружающей среды.

1.3. Если в технических условиях (ТУ) на ППП указана допустимая температура перехода, то допустимое тепловое сопротивление радиатора определяют по формуле

$$R_{p\,доп} = \frac{\Delta t_{p\,доп}}{P'_p} = \frac{t_{пер} - P_{ппп}\cdot R_{пт} - t_c}{P'_p}.\qquad (6)$$

Если в ТУ дана допустимая температура корпуса, то формула имеет вид

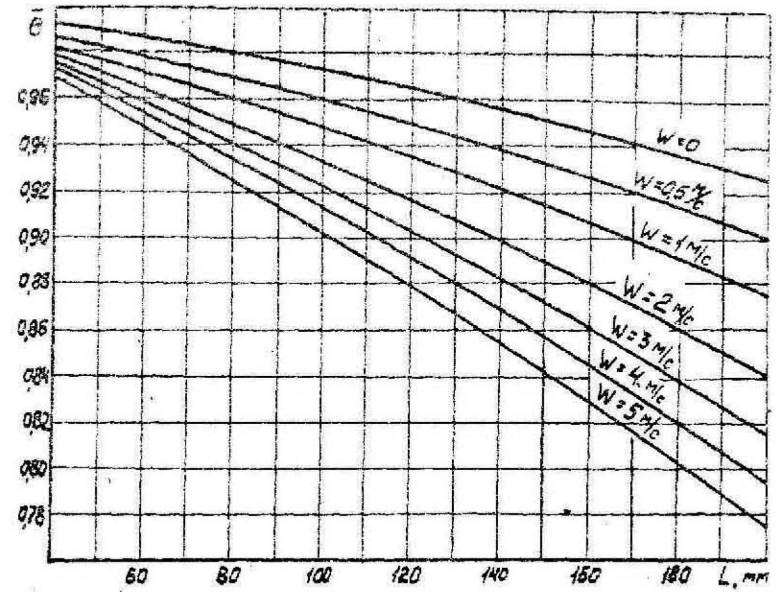
$$R_{p\,доп} = \frac{t_к - P_{ппп}\cdot R_{пк} - t_c}{P'_p}\qquad (7)$$

В случае установки на радиаторе нескольких ППП допустимое тепловое сопротивление радиатора определяют для ППП, находящегося в наиболее жестком режиме, т.е. с минимальной допустимой температурой радиатора.

Примечание. Предельно допустимая температура перехода и корпуса различных ППП представлена в справочном приложении 2.

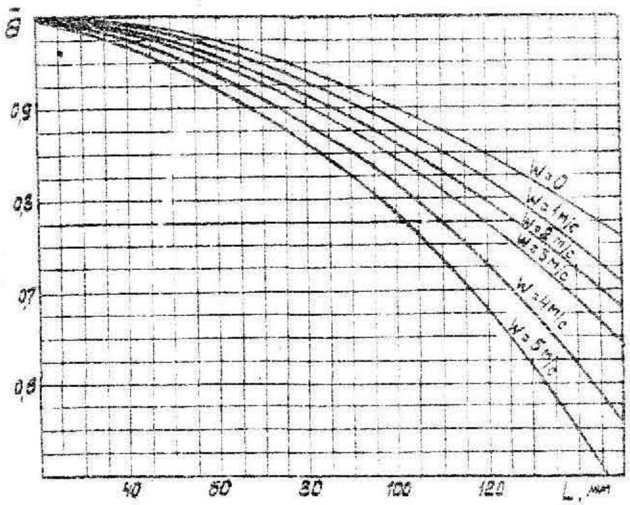


Коэффициент неравномерности температуры ребристого радиатора



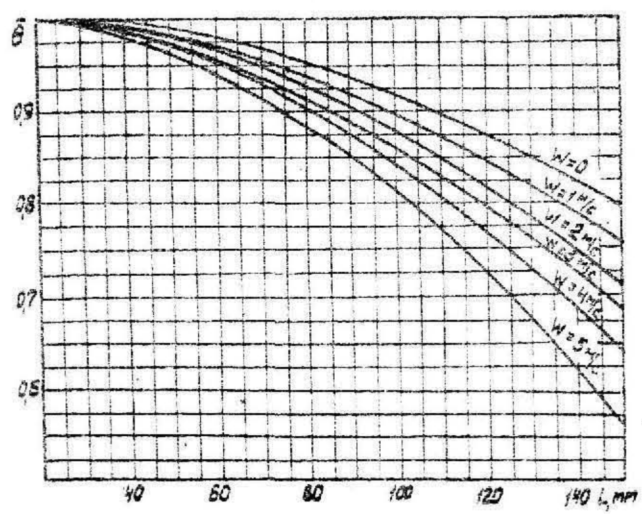

Черт.4

Коэффициент неравномерности температуры
штыревого радиатора




Черт.5

Коэффициент неравномерности температуры
пластинчатого радиатора




Черт.6



## 2. ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА

2.I. Величина сопротивления контакта зависит от:

качества и площади контактных поверхностей;

физических свойств материала;

наличия смазочного вещества между контактными поверхностями;

удельного давления на контактную поверхность, зависящего от усилия затяжки крепящих винтов;

наличия электроизоляционной прокладки между контактными поверхностями.

2.2. Контактная поверхность радиатора должна иметь шероховатость поверхности не более $\overset{2,5}{\nabla}$.

2.3. Контактные поверхности рекомендуется смазывать теплопроводящей пастой КПТ-8 ГОСТ I9783-74 или полиметилсилоксановой жидкостью по ГОСТ I3032-67 с вязкостью от 200 до I000 спз. По опытным данным смазка контактных поверхностей уменьшает тепловое сопротивление контакта в 2-2,5 раза и влияние шероховатости контактных поверхностей, а также влияние случайных факторов (затяжка винтов, попадание пыли под фланец, наличие заусенцев).

2.4. Момент силы затягивания винтов, крепящих ППП к радиатору, должен соответствовать ТУ на ППП.

Момент силы затягивания винтов, крепящих ППП к радиатору, не указанный в ТУ на ППП, должен быть:

для винтов М3 - не менее I,5 кгс·м±I0%;

для винтов М4 - не менее 4 кгс·м±I0%.

При меньшей затяжке винтов тепловое сопротивление контакта резко возрастает.

2.5. При соблюдении пп.2.2-2.4 тепловое сопротивление контакта (без прокладки) определяют из соотношения

$$R_к \cdot F_к = 1, \qquad (8)$$

где $F_к$ - площадь контактной поверхности ППП и радиатора, см$^2$.

Контактные тепловые сопротивления рассчитываются по ОСТ4 Г0.0I2.0I4.

2.6. Наличие электроизоляционных прокладок увеличивает тепловое сопротивление контакта примерно в I,5-4 раза. В качестве изоляции транзисторов от радиаторов могут быть рекомендованы прокладки из:

окиси бериллия по ТУ 95-283-74;

слюды толщиной от 0,025 до 0,05 мм по ГОСТ 7I34-64;

триацетатной пленки по ТУ 6-I7-499-73 толщиной 0,04-0,07 мм в один слой;

материалов АМг2 и сплава В95А, лист 0,3-1,0 мм по ГОСТ 21631-76, покрытие Ан.Окс.из..

Кроме того, возможно применение глубокого изоляционного анодирования посадочных мест под установку ППП.

2.7. Рекомендуемые для расчета средние экспериментальные значения контактных тепловых сопротивлений с применяемыми прокладками при смазке полиметилсилоксановой жидкостью по ГОСТ 13032-67 с вязкостью от 200 до 1000 спз или пастой КПТ-8 по ГОСТ 19783-74 представлены в справочном приложении 3.

2.8. В случае, если ППП электрически изолируются друг от друга, то под один из ППП необходимо поставить электроизоляционную прокладку. Установка прокладки увеличивает тепловое сопротивление контакта и, следовательно, уменьшает допустимую температуру радиатора, поэтому электроизоляционная прокладка ставится под ППП с меньшей мощностью рассеяния.

## 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАТОРОВ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

3.1. Цель расчета:

определение теплосъема при заданных габаритных размерах радиатора;

определение температуры радиатора при заданных габаритных размерах и мощности рассеяния ППП;

определение габаритных размеров радиатора при заданной мощности рессеяния ППП.

3.2. Исходные данные:

мощность, рассеиваемая ППП;

тип ППП;

температура окружающей среды;

наличие электроизоляционной прокладки;

количество ППП;

тип радиатора;

давление.

3.3. При расчете приняты следующие допущения:

теплосъем с боковых сторон ППП не учитывается из-за малого значения этой величины по сравнению с мощностью, рассеиваемой радиатором;

температура радиатора в зоне контакта с ППП принимается одинаковой;

скорость воздуха по сечению радиатора равномерна.

3.4. Теплосъем с радиатора происходит конвекцией с наружных поверхностей $P_1'$, с ребер (штырей) $P_2'$ и излучением $P_Л'$ :

$$P_P' = P_1' + P_2' + P_Л' . \qquad (9)$$



3.5. Теплосъем с наружных поверхностей радиатора определяется по формуле

$$P_1' = \bar{\theta}_p F \alpha (t_{p\,max} - t_c). \qquad (10)$$

К теплоотдающей наружной поверхности ребристого радиатора относятся внешняя поверхность ребер, поверхности торцов ребер, поверхности торцов основания и площадь основания для одностороннего радиатора.

3.6. Коэффициент теплоотдачи с поверхности пластин радиатора рассчитывается по формуле

$$\alpha_{пл} = \frac{Nu\,\lambda}{L}. \qquad (11)$$

Критерий Нуссельта определяется в зависимости от значения критерия Рейнольдса по формулам:

при $Re < 10^5$ $\qquad Nu = 0{,}66\ Re^{0,5}$; $\qquad$ (12)

при $Re > 10^5$ $\qquad Nu = 0{,}032\ Re^{0,8}$. $\qquad$ (13)

За определяющую температуру принимают температуру окружающей среды.

3.7. Теплосъем с пластины штыревого радиатора со стороны штырей определяется по формуле

$$P' = F\alpha \left(t_p - \frac{t_в}{2}\right), \qquad (14)$$

где $F$ – площадь пластины, не занятой штырями, $м^2$.

Перегрев по воздуху в штыревой решетке определяется зависимостью

$$\Delta t_в = \frac{P_{шт}'}{\rho C_p W_{fp}}. \qquad (15)$$

3.8. Теплосъем с внутренних поверхностей ребер радиатора определяется по формуле

$$P_{2p}' = \bar{\theta}_p \alpha F_{вн} (t_{p\,max} - t_c)\,\eta_p. \qquad (16)$$

3.9. Теплосъем со штырей определяется зависимостью

$$P_{2\,шт}' = \bar{\theta}_{шт} \alpha_{шт} F_{шт} \left(\Delta t_{шт} - \frac{\Delta t_в}{2}\right) \eta_{шт}. \qquad (17)$$

Перегрев между штырем и подходящим к нему воздухом определяется из соотношения

$$P'_{шт} = \alpha_{шт} F_{шт} \Delta t_{шт-в} . \quad (18)$$

Средний перегрев штыря относительно окружающей среды равен

$$\Delta t_{шт} = \frac{\Delta t_в}{2} + \Delta t_{шт-в} . \quad (19)$$

Значение $t_р$ определяется по формуле

$$t_р = t_с + \Delta t_{шт} \frac{1}{\eta_{шт}} . \quad (20)$$

3.10. Коэффициент теплоотдачи в общем случае определяется по формуле

$$\alpha = \frac{Nu_f \lambda_f}{d_{экв}} . \quad (21)$$

Эквивалентный диаметр для ребристых радиаторов определяется по формуле

$$d_{экв} = \frac{4F_ж}{U} , \quad (22)$$

где $U$ – омываемый периметр, м.

За эквивалентный диаметр штыревого радиатора принимается средний диаметр штыря.

3.11. Для ребристых радиаторов:

при ламинарном режиме

$$\text{при } Re_f Pr_f \frac{d_{экв}}{L} < 5 \qquad Nu_f = 7{,}5 ; \quad (23)$$

$$\text{при } 100 \geq Re_f Pr_f \frac{d_{экв}}{L} \geq 5 \qquad Nu_f = 7\left(Re_f Pr_f \frac{d_{экв}}{L}\right)^{0{,}045} ; \quad (24)$$

$$\text{при } Re_f Pr_f \frac{d_{экв}}{L} \geq 100 \qquad Nu_f = 1{,}85\left(Re_f Pr_f \frac{d_{экв}}{L}\right)^{1/3} . \quad (25)$$

Примечание. При малых скоростях воздушный поток должен быть направлен вертикально вверх, влияние свободного движения может быть весьма существенным. Необходимо проводить проверочный расчет по формулам для свободного движения и выбирать наибольшее значение;



при турбулентном режиме

$$\text{при } Re_f > 2200 \qquad Nu_f = 0{,}018 \, Re_f^{0{,}8} . \quad (26)$$

Если $L/d < 50$ , полученное из формулы (25) значение необходимо умножить на поправочный коэффициент $\varepsilon_L$ , который определяется по табл.1.

Таблица 1

| $Re_f$ | $L/d$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $2 \cdot 10^3$ | 1,90 | 1,70 | 1,44 | 1,28 | 1,18 | 1,13 | 1,05 | 1,02 | 1,0 |
| $2 \cdot 10^4$ | 1,51 | 1,40 | 1,27 | 1,18 | 1,13 | 1,10 | 1,05 | 1,02 | 1,0 |
| $1 \cdot 10^5$ | 1,28 | 1,22 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,03 | 1,02 | 1,0 |

За определяющую температуру $t_f$ при вычислении $Re_f$ и $Nu_f$ принимают среднюю температуру воздуха в канале радиатора, определяемую из уравнения теплового баланса при заданном значении $t_р - t_с$:

$$C_p \rho_f W f_р \Delta t_в = \alpha F_{вн} (t_р - t_f) ;$$
$$t_в = t_с + \Delta t_в ;$$
$$t_f = t_с + \frac{\Delta t_в}{2} ; \quad (27)$$
$$t_р - t_с = (t_р - t_f) + (t_f - t_с) .$$

3.12. Для штыревых радиаторов критерий Нуссельта определяется зависимостью

$$Nu_f = 0{,}21 \, Re_f^{0{,}65} . \quad (28)$$

За расчетную скорость принята скорость воздуха в живом сечении радиатора:

$$W_р = W\left(1 + \frac{d}{S-d}\right) . \quad (29)$$

За определяющую температуру $t_f$ принята средняя температура воздуха в решетке радиатора.

3.13. Если скорость воздуха, подходящего к радиатору, не определена, то она определяется из условия равенства падения давления в каналах радиатора и в электронном блоке на участке, параллельном радиатору.

Примечание. Если вентилятор работает только на радиатор, расход воздуха через радиатор и, следовательно, его скорость определяются наложением характеристики вентилятора $\Delta H = f(V)$ на характеристику радиатора $\Delta p = f(V)$, где $V = W \cdot F_{ж}$, $F_{ж}$ – площадь живого сечения радиатора.

3.14. Лучистый теплосъем с радиатора определяется по формуле

$$P_л = \alpha_л F_л (t_{p\,max} - t_c)\bar{\theta}_p . \qquad (30)$$

Лучистый коэффициент теплоотдачи определяется по графику справочного приложения 5 или по формуле:

$$\alpha_л = \frac{\varepsilon_{пр} C_0 (T_p^4 - T_c^4) \cdot 10^{-8}}{t_p - t_c} , \qquad (31)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы $(\varepsilon_{пр} = \varepsilon_1 \varepsilon_2)$.

3.15. При различных значениях перегрева радиатора $\Delta t_p$ рассчитываются зависимости

$$P_1' = f(\Delta t_p);$$
$$P_2' = f(\Delta t_p);$$
$$P_л' = f(\Delta t_p)$$

и определяется суммарный теплосъем или по суммарной тепловой характеристике радиатора (п.3.4) определяется искомый перегрев его.

При заданной мощности рассеяния ППП и определенном перегреве габариты радиаторов целесообразно определить по графикам или методом последовательных приближений.

## 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАТОРОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

4.1. Теплосъем с радиатора при естественной конвекции, как и при вынужденной конвекции, происходит за счет конвекции с наружных поверхностей $P_1'$, с ребер (штырей) $P_2'$ и излучением $P_л'$.

4.2. Теплосъем с наружной поверхности радиатора определяется по формуле

$$P_1' = \alpha_{пл} F_{пл} \Delta t_p . \qquad (32)$$



К теплоотдающей наружной поверхности ребристого радиатора относится внешняя поверхность ребер, поверхность торцов основания и поверхности основания.

К теплоотдающей наружной поверхности штыревого радиатора относится поверхность основания.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности пластины радиатора определяется по формуле

$$\alpha_{пл} = \frac{Nu_m \lambda_m}{L} , \qquad (33)$$

где

$$Nu_m = C (Gr\,Pr)_m^n . \qquad (34)$$

Коэффициент $C$ и степень $n$ выбираются из табл.2.

Таблица 2

| $(Gr\,Pr)_m$ | $C$ | $n$ |
|---|---|---|
| $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{2}$ | 1,180 | 1/8 |
| $5 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 10^{7}$ | 0,540 | 1/4 |
| $2 \cdot 10^{7} - 1 \cdot 10^{13}$ | 0,135 | 1/3 |

Определение коэффициента теплоотдачи может проводиться по номограммам справочного приложения 4.

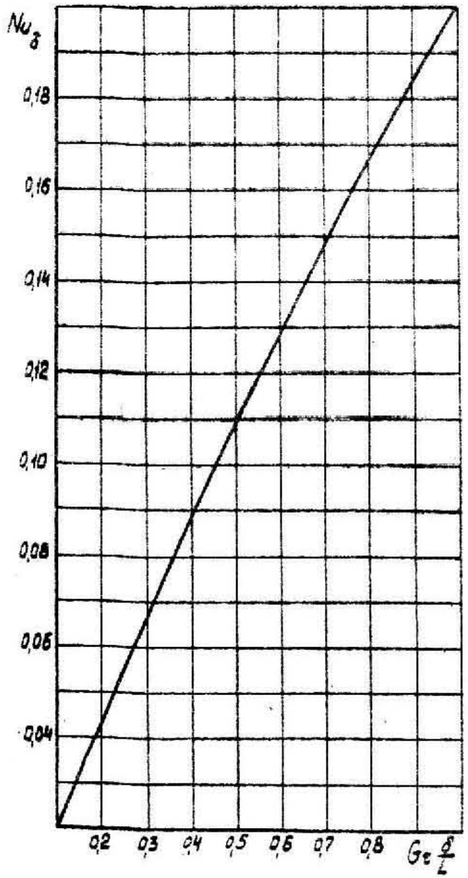
4.3. Коэффициент теплоотдачи с внутренних поверхностей ребристого радиатора определяется по формуле

$$\alpha_{вн} = \frac{Nu_\delta \cdot \lambda}{\delta} . \qquad (35)$$

Критерий Нуссельта $Nu_\delta$ определяется по черт.7-8 или зависимостью

$$Nu_\delta = \frac{6\,Gr_\delta \frac{\delta}{L}}{12{,}84 + Gr_\delta \frac{\delta}{L}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{51{,}4\,Gr_\delta \frac{\delta}{L}}{\left(12{,}84 + Gr_\delta \frac{\delta}{L}\right)^2}}\right)^{-1} . \qquad (36)$$

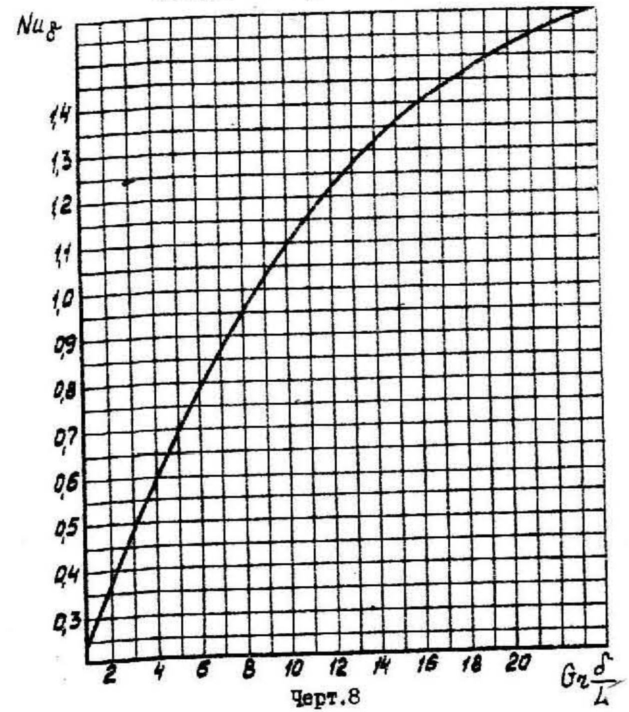
Критерий Нуссельта для внутренних поверхностей радиатора




Черт.7



Критерий Нуссельта для внутренних поверхностей радиатора




Черт.8

Комплекс $Gr_\delta \frac{\delta}{L}$ рассчитывается зависимостью, взятой по половине межреберного расстояния для начальных параметров воздуха:

$$Gr_\delta \frac{\delta}{L} = \frac{g\beta\Delta t\delta^3}{\nu^2} \cdot \frac{\delta}{L} . \qquad (37)$$

Формула применима для комплекса

$$Gr_\delta \frac{\delta}{L} \leq 22 .$$

При $Gr_\delta \frac{\delta}{L} > 22$ использовать расчетные зависимости для пластинчатого радиатора.

4.4. Коэффициент теплоотдачи со штыря определяется по формуле (21). Критерий Нуссельта определяется зависимостью

$$Nu_f = 1{,}18(Gr\,Pr)_f^{1/3} \qquad \text{при } 1\cdot 10^{3} \le Gr\,Pr \le 5\cdot 10^{2} \qquad (38)$$

За определяющую температуру принята средняя температура воздуха в решетке радиатора.

Примечание. Для первого приближения за определяющую температуру принимается температура воздуха, подходящего к радиатору.

4.5. Скорость воздуха в решетке радиатора рассчитывается из решения уравнения аэродинамического сопротивления решетки радиатора и гравитационного напора.

Аэродинамическое сопротивление в каналах ребристого радиатора определяется по формулам:

при ламинарном режиме

$$\Delta P = \frac{96}{Re}\cdot\frac{L}{d}\cdot\frac{\rho}{2g}W^2 \qquad (Re < 3000); \qquad (39)$$

при турбулентном режиме

$$\Delta P = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}}\cdot\frac{L}{d}\cdot\frac{\rho}{2g}W^2 \qquad (Re > 3000). \qquad (40)$$

Аэродинамическое сопротивление штыревой решетки коридорного расположения описывается уравнением, полученным экспериментальным путем:

$$\Delta P = (5{,}7+0{,}22N_1)\left(\frac{d}{S_1}\right)^{1{,}7}\cdot\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0{,}76}\cdot\frac{\mu}{g}\cdot\frac{W}{d} + 0{,}9N_1\left(\frac{d}{S_1}\right)^{1{,}7}\cdot\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{0{,}76}\cdot\frac{\rho}{g}W^2. \qquad (41)$$

Формула применима для значений

$$\frac{S_1-d}{S_1} \ge 0{,}4 \quad / \quad S_2 - S_1 .$$

Примечание. В дальнейших расчетах принимаем $S_1 = S_2 = S$.

За определяющую скорость принята скорость воздуха, подходящего к стержневой решетке. Первый член уравнения учитывает влияние вязкостных сил при малых скоростях течения (ламинарный режим), второй член уравнения учитывает влияние инерционных сил, преобладающих при больших скоростях.



Падение давления в решетке радиатора зависит от диаметра стержня, поперечного и продольного шага, числа стержней по ходу воздуха, скорости и температуры подходящего воздуха.

Гравитационный напор определяется по формуле

$$\Delta H = \frac{\rho_c}{2}\cdot\frac{\Delta t_в}{T_в}L . \qquad (42)$$

4.6. Перегрев воздуха в штыревой решетке определяется по формуле (15).

4.7. Теплосъем с радиатора излучением определяется согласно п.3.14:

$$P'_л = \alpha_л F \Delta t_р ; \qquad (43)$$

4.8. Для различных значений перегрева радиатора рассчитываются зависимости

$$P'_1 = f(\Delta t_р); \quad P'_2 = f(\Delta t_р); \quad P_л = f(\Delta t_р),$$

и по суммарной тепловой характеристике определяется искомый перегрев радиатора.

4.9. Теплосъем с радиатора, работающего при разрежении, имеет вид $P'_р = P'_{750}\cdot A$,

где $P'_{750}$ – теплосъем с радиатора при нормальном давлении.

Зависимость поправочного коэффициента $A$ от степени разрежения представлена на графике справочного приложения 6.

## 5. ОПТИМАЛЬНЫЙ ШАГ РАДИАТОРОВ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

5.1. Оптимальный шаг – это шаг, обеспечивающий для радиатора с заданными габаритными размерами, толщиной ребра (штыря) и температурой основания рассеяние максимальной мощности. Оптимальный шаг радиатора изменяется в зависимости от высоты радиатора и толщины ребра (штыря).

5.2. Максимальный теплосъем с радиатора (при одних и тех же габаритных размерах и постоянном перегреве) определяется коэффициентом теплоотдачи с ребер (штырей) и поверхностью их.

5.3. Коэффициент теплоотдачи зависит от скорости воздуха в решетке радиатора, межреберного расстояния, диаметра штыря и расстояния между штырями, высоты радиатора.

5.4. Скорость воздуха определяется из условия равенства падений давления при различных шагах в радиаторе:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \ldots = \Delta P_n , \qquad (44)$$

где $\Delta P_{1,2,\ldots,n}$ – падение давления в решетке радиатора, кг/м$^2$.

Для определенной высоты радиатора и толщины ребра (штыря) определяется скорость воздуха в зависимости от шага радиатора (черт.9) при $\Delta p = const$.

По определенной скорости для различных шагов рассчитывается коэффициент теплоотдачи и темплосъем с внутренних поверхностей ребер (штырей) радиатора согласно пп.3.7-3.12.

5.5. Для рассчитанной зависимости $P_1' = f(S)$ при постоянной толщине ребра (диаметра штыря) и постоянной высоте радиатора оптимальный шаг определяется по максимальному теплосъему с радиатора или по максимальному значению произведения коэффициента теплоотдачи на число ребер (штырей) $\alpha \cdot n$.

Число ребер в ребристом радиаторе определяется по формуле

$$n = \frac{B-b}{2\delta+b} + 1. \qquad (45)$$

Для ребристого радиатора зависимость оптимального межреберного расстояния от высоты радиатора и толщины ребра в диапазоне скоростей $W = 0{,}5-5$ м/с представлена на черт.10.

Изменение оптимального шага от высоты ребра в пределах от 12 до 32 мм незначительно.

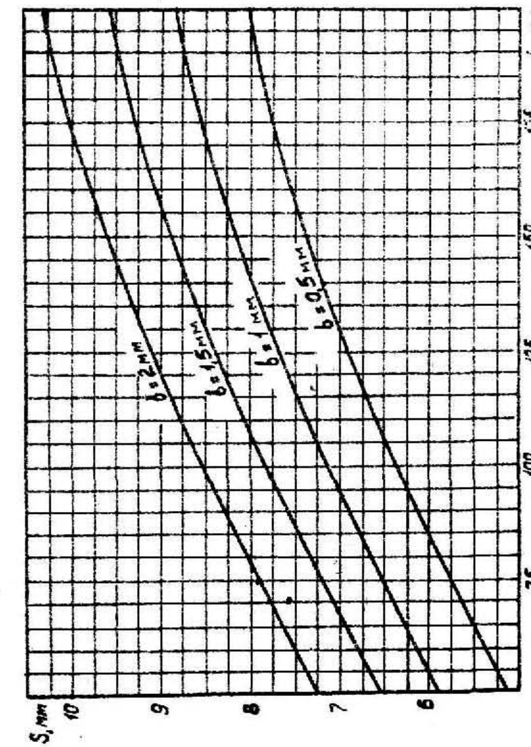
Число штырей в штыревом радиаторе определяется по формуле

$$N = N_1 \cdot N_2 ; \quad N_1 = \frac{L-d}{S} + 1 ; \quad N_2 = \frac{B-d}{S} + 1 . \qquad (46)$$

Для штыревого радиатора зависимость оптимального шага от высоты радиатора и диаметра штыря в диапазоне скоростей $W = 0{,}5-5$ м/с представлена на черт.11.

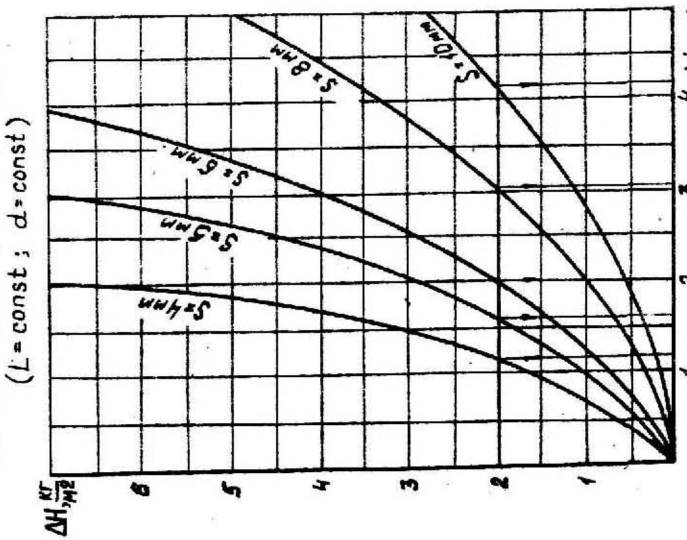


Выбор оптимального шага ребристого радиатора при вынужденной конвекции



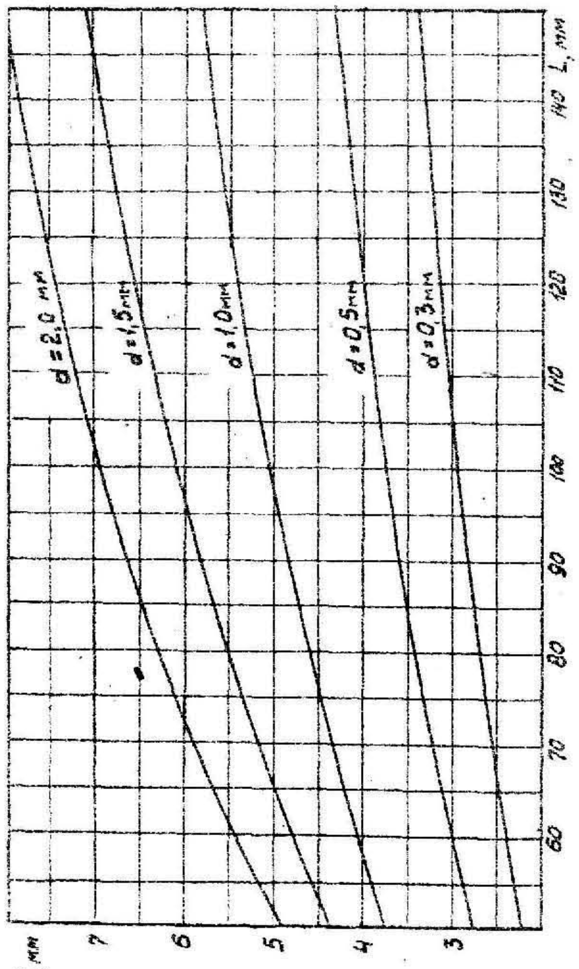

Черт.10

Скорость воздуха в решетке радиатора
($L = const$; $d = const$)




Черт.9

Оптимальный шаг штыревых радиаторов для вынужденной конвекции (при $H_1 \leq 20$ мм)




Черт.11



## 6. ОПТИМАЛЬНЫЙ ШАГ РАДИАТОРОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

6.1. Оптимальный шаг радиатора при естественной конвекции так же, как и при вынужденной конвекции, определяется максимальным теплосъемом с ребер (штырей) и зависит от высоты радиатора и толщины ребра (штыря).

6.2. Порядок расчета оптимального шага при естественной конвекции аналогичен расчету оптимального шага при вынужденной конвекции. Скорость воздуха в решетке (ребрях) радиатора определяется из решения уравнения аэродинамического сопротивления и гравитационного напора. Коэффициент теплоотдачи и теплосъем с внутренней поверхности ребер (штырей) радиатора определяется согласно пп.4.3, 4.4 и формулам (16) и (17).

6.3. Из рассчитанной зависимости $P'_p = f(S)$ для постоянных значений высоты радиатора и толщины ребра (штыря) радиатора по максимальному теплосъему определяется оптимальный шаг.

Для ребристого радиатора зависимость оптимального шага от высоты радиатора и толщины ребра представлена на черт.12.

Для штыревого радиатора зависимость оптимального шага от высоты радиатора и диаметра штыря представлена на черт.13.

## 7. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕБРА И ШТЫРЯ

7.1. Для сравнений и оценки теплосъема с ребер и штырей различной формы и длины при одинаковых условиях эксплуатации вводится понятие эффективности ребра и штыря:

$$\eta_p = \frac{P'_p}{P'_{op}}; \qquad \eta_{шт} = \frac{P'_{шт}}{P'_{o\,шт}},$$

где $P'_p$, $P'_{шт}$ – теплосъем с ребра (штыря) при наличии градиента температуры по длине ребра (штыря), Вт;

$P'_{op}$, $P'_{o\,шт}$ – теплосъем с ребра (штыря) при неизменной температуре ребра (штыря), равной температуре основания радиатора, Вт.

7.2. Для ребра и штыря с прямоугольным и круглым поперечными сечениями эффективность определяется по формуле

$$\eta = \frac{1}{mH_1} th(mH_1), \tag{47}$$

где $m = 2\sqrt{\frac{\alpha_p}{\lambda\delta}}$ – для ребра; $m = 2\sqrt{\frac{\alpha_{шт}}{\lambda d}}$ – для штыря.

7.3. Для штыря призматической и конической форм эффективность выражается формулой

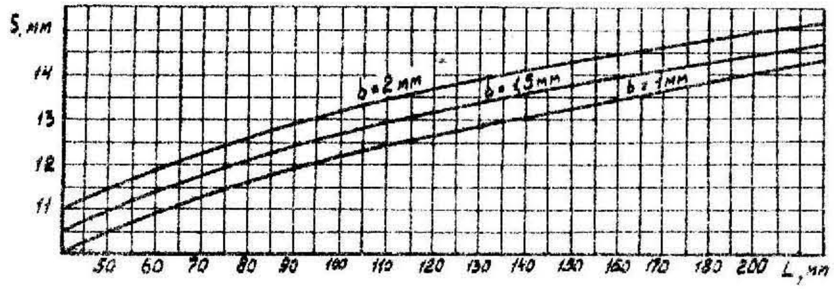
$$\eta_{шт} = \frac{4}{2mH_1} \cdot \frac{I_2(2mH_1)}{I_1(2mH_1)}, \qquad (48)$$

где $I_1$ – функция Бесселя первого рода первого порядка мнимого аргумента;

$I_2$ – функция Бесселя первого рода второго порядка мнимого аргумента.

7.4. Значение эффективности ребер (штырей) $\eta$ в зависимости от комплекса $mH_1$ представлено на черт.I4.

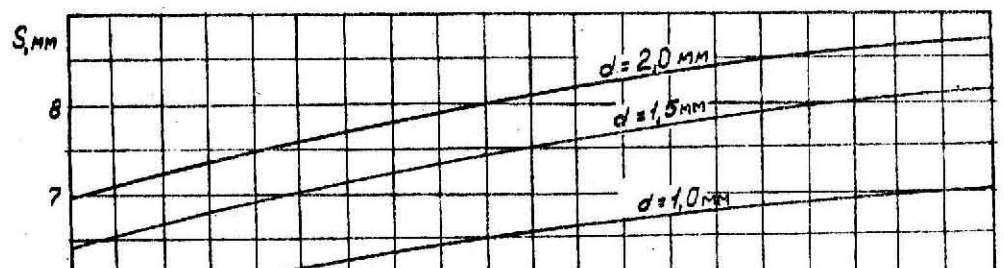
Выбор оптимального шага
ребристого радиатора при естественной конвекции



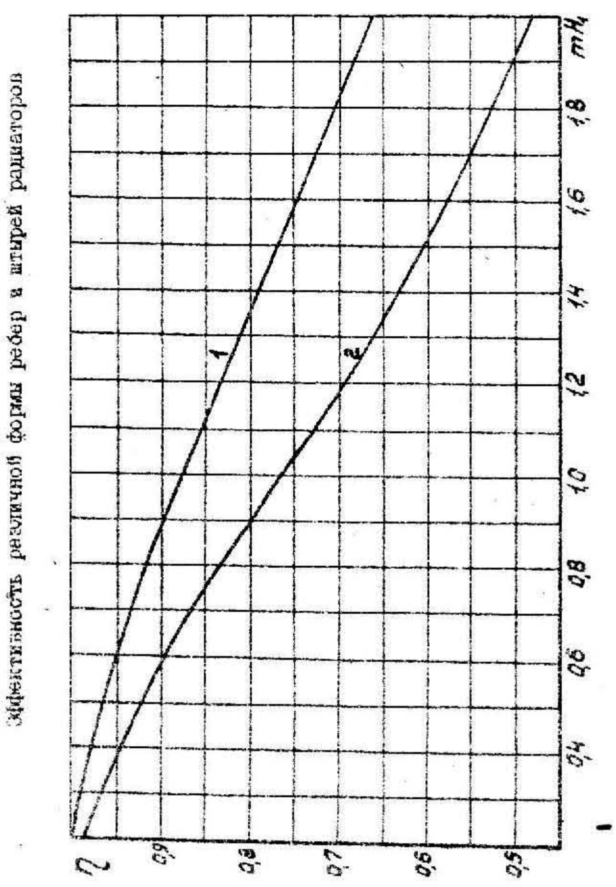

Черт.I2



Оптимальный шаг штыревых радиаторов для естественной
конвекции (при $H \leq 20$ мм)




Черт.I3




1 – коническая и пирамидальная форма штырька;
2 – цилиндрическая форма штырька и призматическая форма ребра

Черт.14



## 8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ

8.1. Для изготовления радиаторов необходимо применять материалы, обладающие хорошей теплопроводностью и малым удельным весом, а также отвечающие требованиям технологии изготовления. Наибольшую теплопроводность имеют медь и алюминий, но медь более чем в три раза тяжелее алюминия и дороже, поэтому целесообразнее применять алюминий, а при жестких требованиях к массе – магний. Однако изготовление радиаторов из магниевых сплавов (МА-1, МА-3, МА-8, МЛ-5, ВМ-65-1) более трудоемко.

В табл.3 представлены некоторые характеристики используемых материалов.

Таблица 3

| Материал | Марка | Плотность, кг/м$^3$ | Теплопроводность, Вт/(м·°С) |
|---|---|---|---|
| Технический алюминий | АД1, АД, АМ<br>АМ1 | 2710<br>2730 | 218-226<br>180 |
| Алюминиевые сплавы | АЛ2,<br>АЛ9,<br>Д16М,<br>Д16Т | 2650<br>2660<br>2780<br>2780 | 175<br>151<br>192<br>121 |
| Медь | М1, М2, М3 | 8940 | 385 |
| Латунь | Л96 | 8850 | 247 |
| Магниевые сплавы | МА-1,<br>МА-3,<br>МА-8,<br>ВМ-65-1 | 1700-1800 | 116<br>65<br>124<br>109 |

8.2. Оптимальные параметры радиаторов выбираются согласно разделам 5 и 6.

8.3. При подборе покрытия для радиатора необходимо, чтобы степень черноты покрытия была не менее 0,85.

8.4. Для снижения теплового сопротивления контакта контактная поверхность должна иметь шероховатость не более $\overset{2,5}{\surd}$

При наличии пасты КПТ-8 допускается шероховатость контактной поверхности $\overset{R_z 40}{\surd}$ – $\overset{20}{\surd}$ . Рекомендации по снижению теплового сопротивления

контакта изложены в п.2.3.

8.5. Не рекомендуется применять ребристые радиаторы с высотой ребра и штыревые радиаторы с высотой штыря более 32 мм.

8.6. Если радиатор установлен на горизонтальные шасси, то снизу необходимо предусмотреть отверстие для прохода воздуха или поднять радиатор над шасси на расстояние не менее 10-15 мм.

8.7. При естественном охлаждении радиатора пластину радиатора следует устанавливать вертикально.

8.8. При вынужденной конвекции пластину радиатора следует устанавливать по направлению потока воздуха.

## 9. СРАВНЕНИЕ ШТЫРЕВЫХ И РЕБРИСТЫХ РАДИАТОРОВ

9.1. Сравнение радиаторов различных видов следует производить по определенным параметрам:

по рассеиваемой мощности, отнесенной к весу радиатора на 1°C перегрева ( $\frac{P}{G\Delta t}$ );

по рассеиваемой мощности, отнесенной к габаритному объему радиатора на 1°C перегрева ( $\frac{P}{V\Delta t}$ ).

9.2. Необходимым условием является сравнение радиаторов при оптимальных параметрах, т.е. при таких соотношениях толщины ребра (штыря) и шага, которые обеспечивают максимальный теплосъем с радиатора.

Сравнение радиаторов должно производиться при одних и тех же габаритных размерах (высоте радиатора, длине ребра (штыря), толщине основания плиты радиатора) и для одних и тех же внешних условий.

9.3. При сравнении по мощности, отнесенной к единице массы радиатора на 1°C перегрева, в зависимости от высоты ребра (штыря), габаритных размеров радиатора, толщины основания штыревые радиаторы имеют преимущество до 30% при естественной конвекции и до 20-60% - при вынужденной конвекции.

По мощности, отнесенной к единице объема на 1°C перегрева, в зависимости от высоты радиатора, толщины штыря при одних и тех же габаритных размерах ребристые радиаторы имеют преимущество до 80% по сравнению со штыревыми (для естественной и вынужденной конвекций).

## 10. ВЫБОР НОРМАЛИЗОВАННЫХ РАДИАТОРОВ

10.1. Для пластинчатых радиаторов различной высоты на черт.15 и 16 представлены зависимости соответственно для естественной и вынужденной конвекций

$$\frac{P}{F_{осн}} = f(\Delta t), \quad \frac{P}{\Delta t F_{осн}} = f(W),$$



из которых по двум заданным парметрам находится третий.

10.2. Для ребристых радиаторов, работающих при естественной конвекции, на черт.17 представлена зависимость

$$\frac{P}{F_{осн} K_H K_L} = f(\Delta t),$$

а поправочные коэффициенты на высоту ребра $K_H$ и высоту радиатора $K_L$ представлены на черт.18.

10.3. Для ребристых радиаторов, работающих при вынужденной конвекции, соответственно для односторонних и двусторонних радиаторов на черт.19 и 20 представлена зависимость

$$\frac{P}{F_{осн} K_H K_L} = f(\Delta t),$$

а поправочные коэффициенты представлены на черт.21.

10.4. Для штыревых радиаторов, работающих при естественной конвекции, на черт.22 представлена зависимость

$$\frac{P}{F_{осн} K_H K_L} = f(\Delta t),$$

а поправочные коэффициенты представлены на черт.23 для $S = 7$ мм, на черт.24 - для $S = 9$ мм.

10.5. Для штыревых радиаторов, работающих при вынужденной конвекции, на черт.25 представлена зависимость

$$\frac{P}{F_{осн} K_H K_L} = f(\Delta t),$$

а поправочные коэффициенты представлены на черт.26 для $S = 5$ мм, на черт.27 - для $S = 7$ мм.

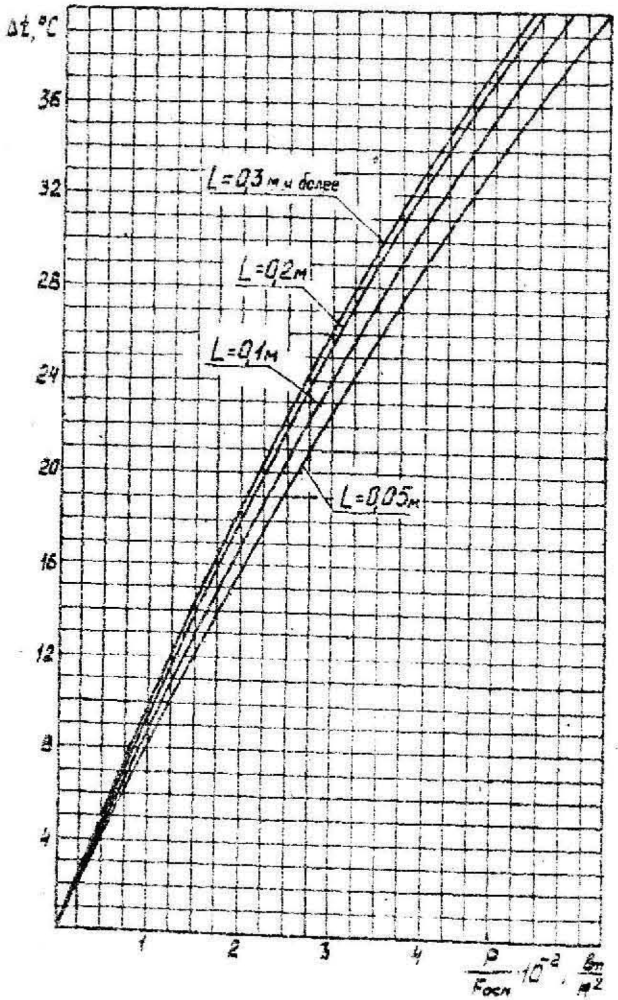
10.6. По выбранной высоте радиатора и длине ребра (штыря) можно определить габаритные размеры радиатора (см.черт.16-27).

При заданных габаритных размерах радиатора из зависимости

$$\frac{P}{F_{осн} K_H K_L} = f(\Delta t)$$

определяется рассеиваемая мощность с радиатора (при рассчитанном перегреве) или перегрев радиатора (при известной мощности рассеяния).

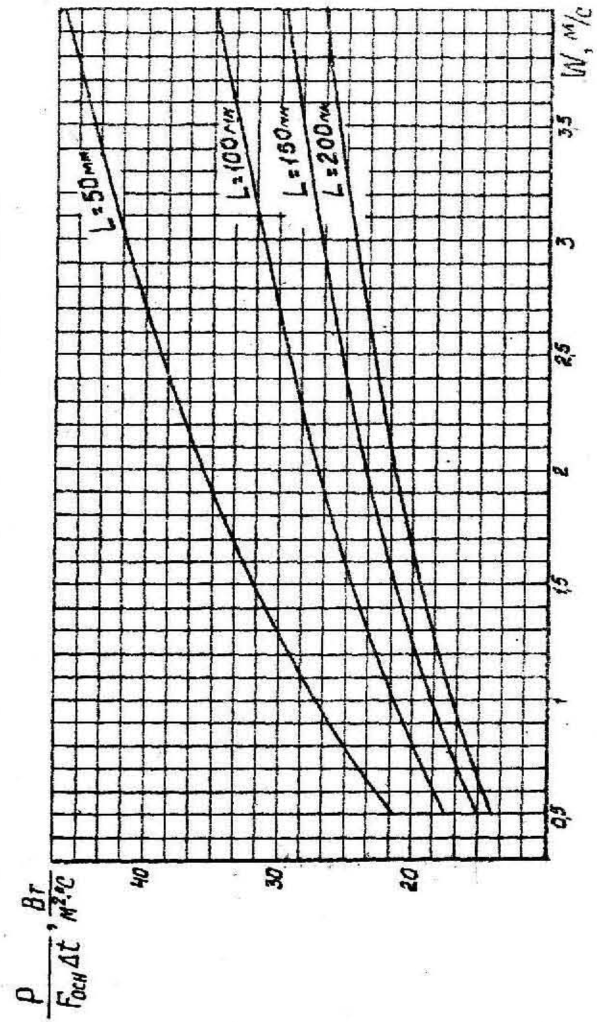
Пластинчатые радиаторы. Естественная конвекция




Черт.I5

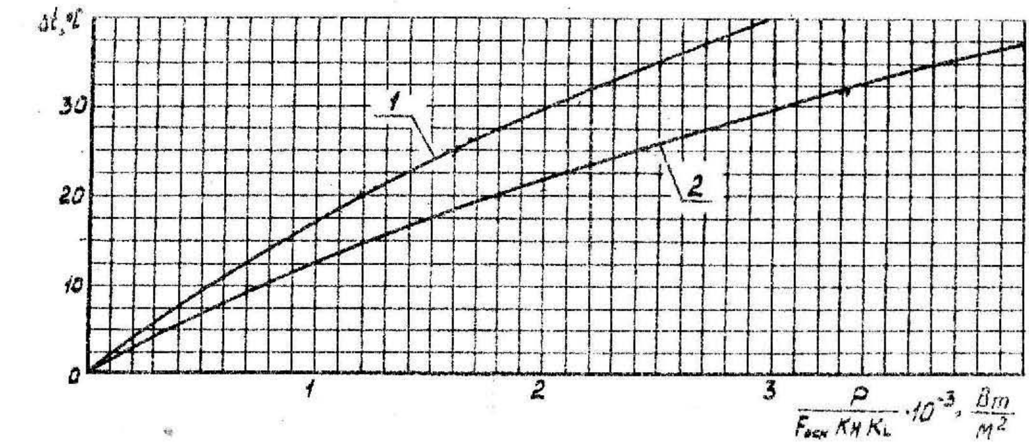


Пластинчатые радиаторы. Вынужденная конвекция




Черт.I6

Ребристые радиаторы. Естественная конвекция

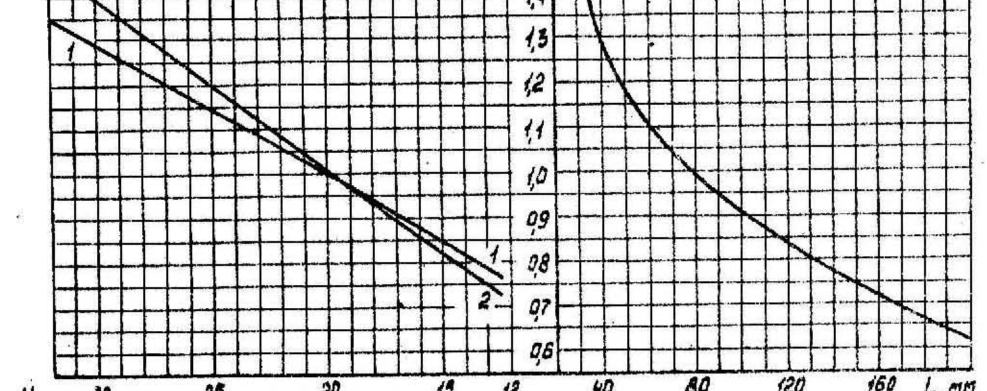



I – односторонний радиатор;

2 – двусторонний радиатор

Черт.17

Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора.
Ребристые радиаторы. Естественная конвекция

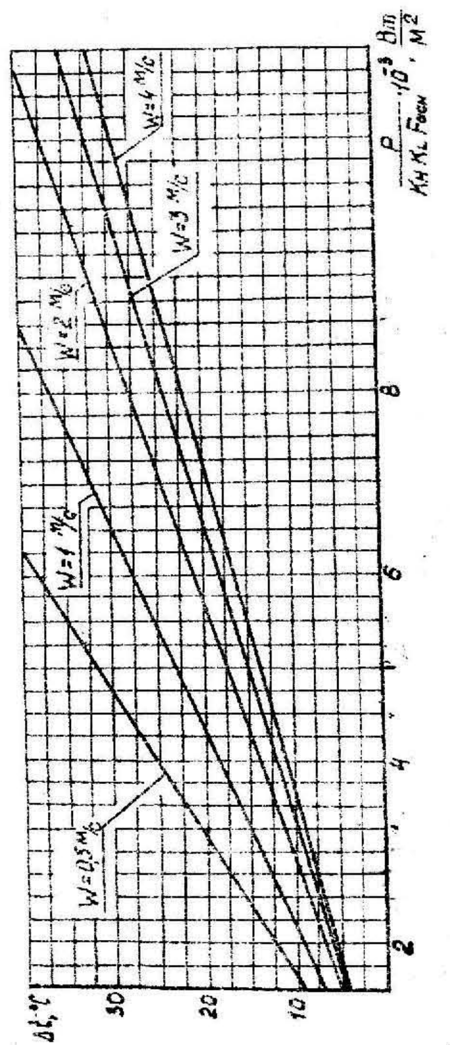



I–I – односторонний радиатор;

2–2 – двусторонний радиатор

Черт.18

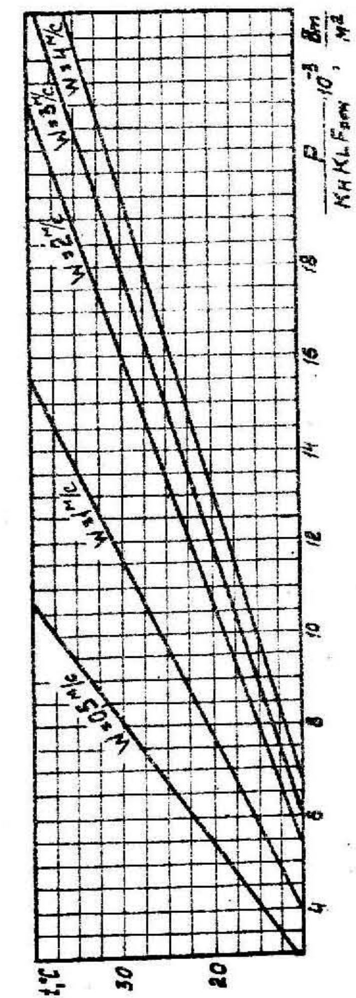
Односторонний ребристый радиатор. Вынужденная конвекция




Черт.19

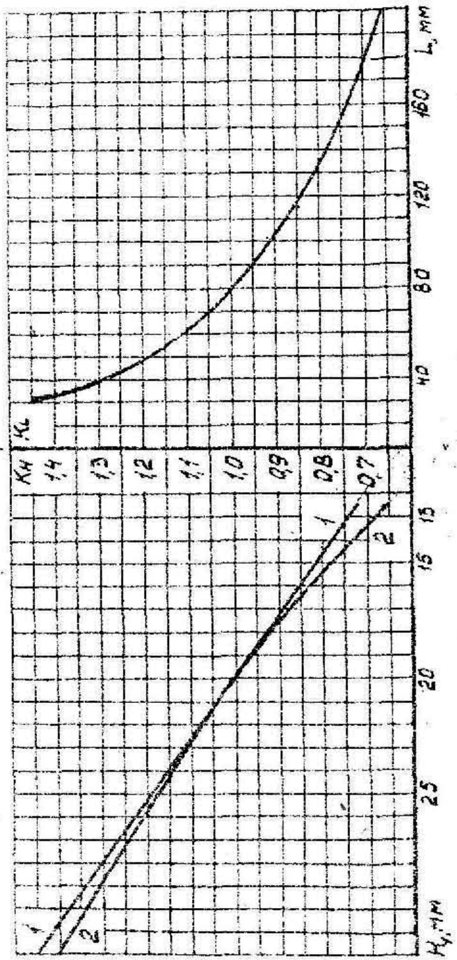


Двусторонний ребристый радиатор. Вынужденная конвекция




Черт.20

Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора.
Радиаторы ребристые. Вынужденная конвекция

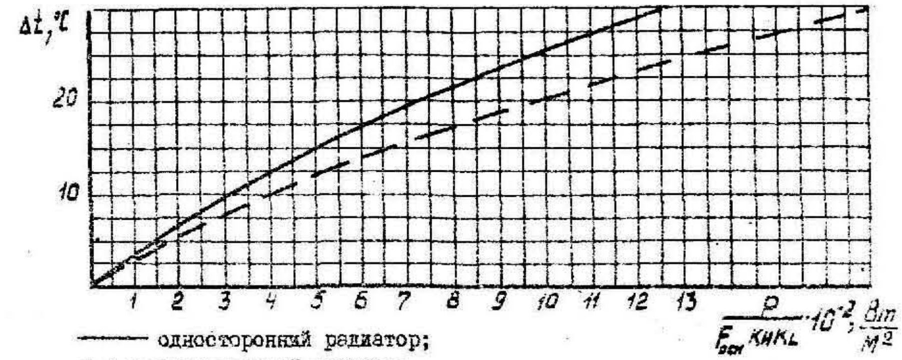



I-I - односторонний радиатор;
2-2 - двусторонний радиатор

Черт.2I



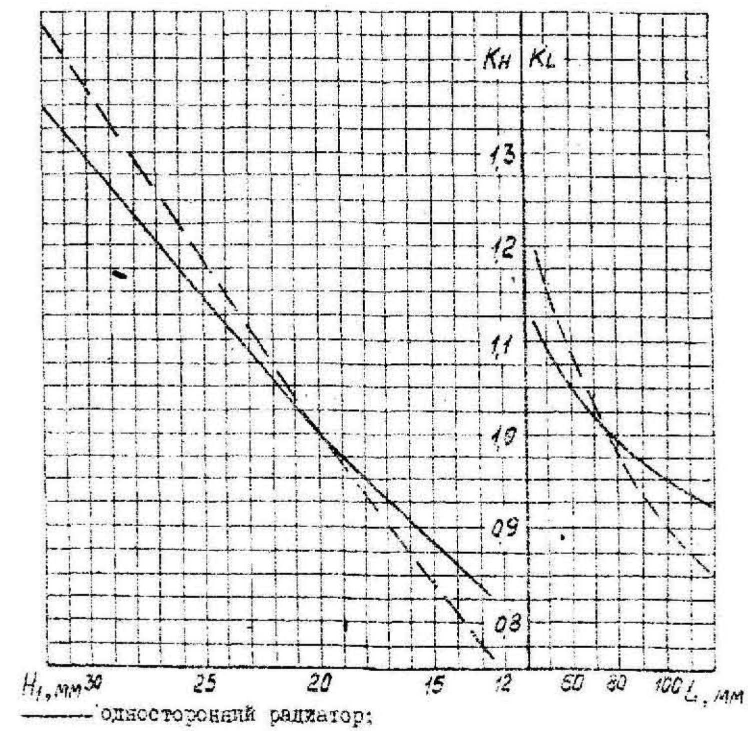
Штыревые радиаторы. Естественная конвекция




——— односторонний радиатор;
– – – двусторонний радиатор

Черт.22

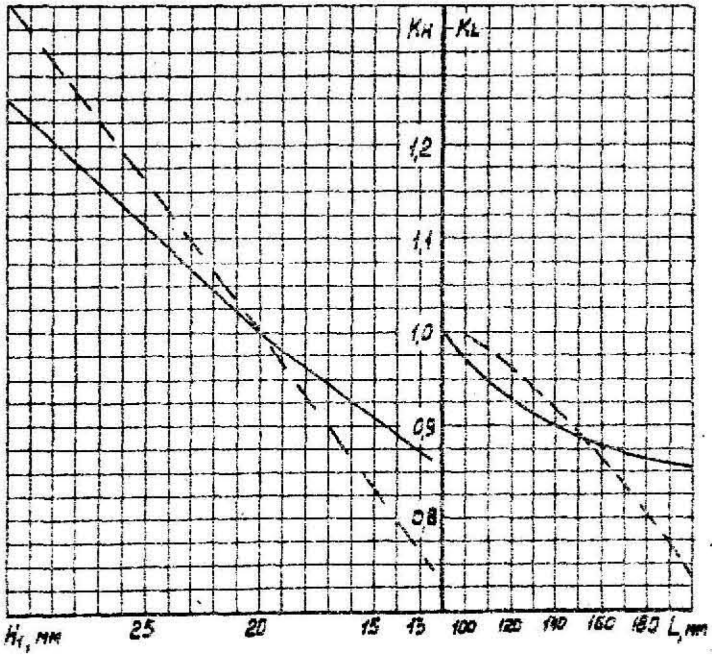
Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора при $S = 7$ мм.
Штыревые радиаторы. Естественная конвекция




——— односторонний радиатор;
– – – двусторонний радиатор

Черт.23

Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора при S = 9 мм. Штыревые радиаторы. Естественная конвекция

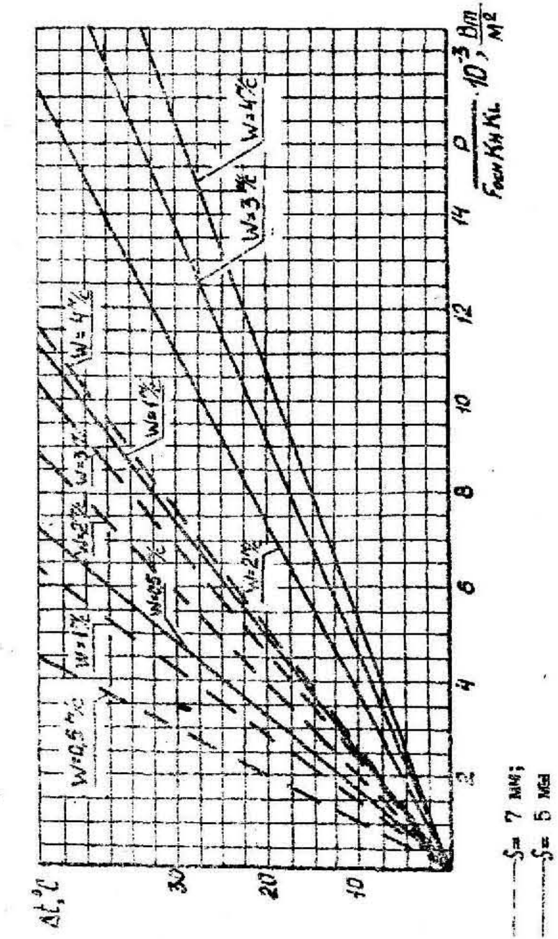



——— односторонний радиатор;
— — — двусторонний радиатор

Черт.24



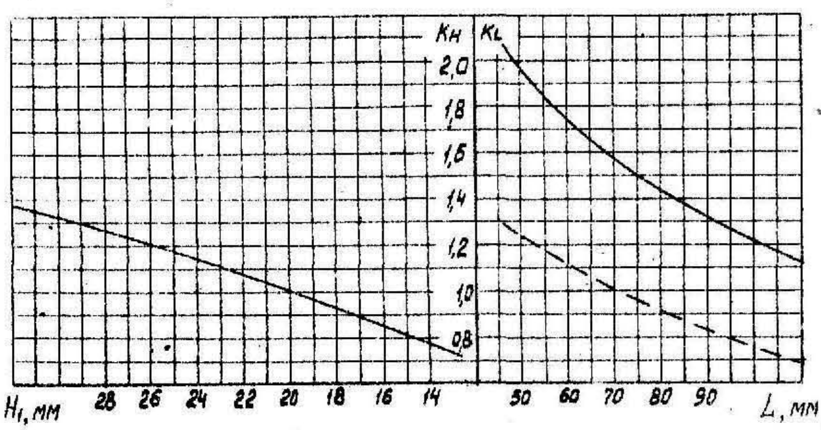
Штыревые радиаторы. Вынужденная конвекция




——— δ= 7 мм;
——— δ= 5 мм

Черт.25

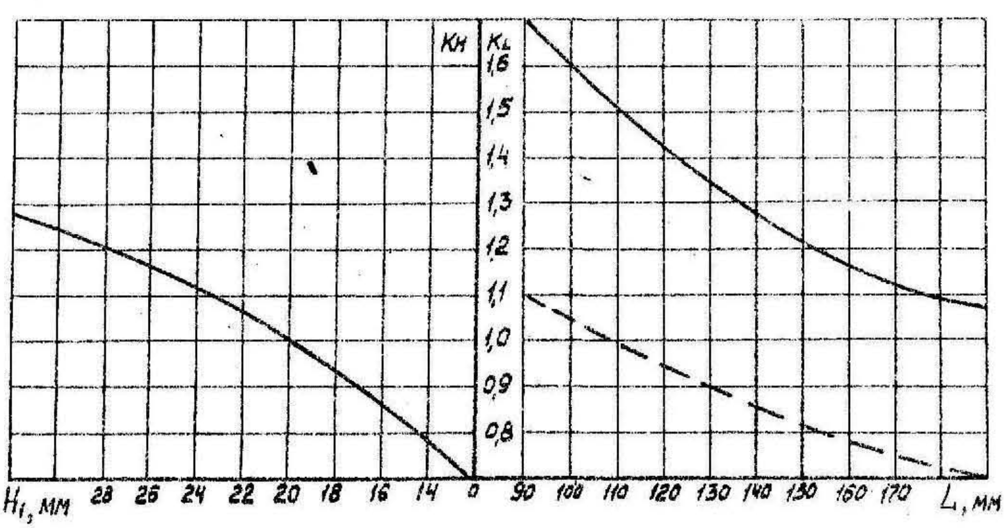
Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора при S = 5 мм. Штыревые радиаторы. Вынужденная конвекция




– – – односторонний радиатор;
——— двусторонний радиатор

Черт.26

Поправочные коэффициенты на длину и высоту радиатора при S = 7 мм. Штыревые радиаторы. Вынужденная конвекция




– – – односторонний радиатор;
——— двусторонний радиатор

Черт.27

## II. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА РАДИАТОРОВ

### II.I. Пример I. Расчет ребристого радиатора при естественной конвекции

На радиатор с односторонним оребрением установлены два транзистора типа П217 мощностью рассеяния $P$ = 3 Вт и $P$ = 5 Вт, изолированные друг от друга электроизоляционной триацетатной прокладкой. Транзисторы установлены на неоребренной поверхности.

Габаритные размеры радиатора: высота $L$ = 100 мм;
ширина $B$ = 101 мм;
глубина $H$ = 25 мм.

Высота ребра радиатора $H_1$ = 20 мм.
Толщина ребра радиатора $b$ = I мм.
Шаг радиатора $S$ = 10 мм.
Толщина основания $h$ = 5 мм.
Температура окружающей среды $t_c$ = 50°С.
Атмосферное давление $P''$ = 760 мм рт.ст.

Приведенная степень черноты системы (радиатор-среда) $\varepsilon_{пр}$=0,85.

Определить температуру перехода транзисторов

Решение.

Расчет проводится в следующем порядке:

для межреберного расстояния $2\delta = S - b$, равного 9 мм, по формулам (35)-(37) или по графикам (см.черт.7,8) вычисляется коэффициент теплоотдачи $\alpha_{вн}$;

коэффициент теплоотдачи $\alpha_н$ для наружных поверхностей вычисляется по формулам (33)-(34) или из справочного приложения 4;

теплосъем излучением определяется по формуле (43), коэффициент теплоотдачи выбирается из справочного приложения 5;

для различных значений $\Delta t_p$ (5,10...°С) вычисляется зависимость $P_p' = P_{вн}' + P_н' + P_л'$ и строится график зависимости $P_p' = f(\Delta t_p)$.

Данные расчета приведены в табл.4.



Таблица 4

| Перегрев радиатора $\Delta t_p$, °С | Поверхность рассеяния $F \cdot 10^3$, м² | Определяющий размер, мм | Определяющая температура, °С | Критерий Нуссельта $Nu$ | Коэффициент теплоотдачи $\alpha$, Вт/(м²·°С) | Мощность рассеяния $P$, Вт |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [illegible] | $F_{вн}$ = 49,00 | 4,5 | 50,0 | 0,366 | 2,293 | 0,562 |
| | $F_н$ = 17,65 | 100,0 | 52,5 | 12,826 | 3,638 | 0,321 |
| | $F_л$ = 30,25 | - | 50,0 | - | 6,660 | 1,007 |
| …0 | $F_{вн}$ = 49,00 | 4,5 | 50,0 | 0,597 | 3,740 | 1,630 |
| | $F_н$ = 17,65 | 100,0 | 55,0 | 15,120 | 4,315 | 0,762 |
| | $F_л$ = 30,25 | - | 50,0 | - | 6,834 | 2,067 |
| …5 | $F_{вн}$ = 49,00 | 4,5 | 50,0 | 0,790 | 4,848 | 3,637 |
| | $F_н$ = 17,65 | 100,0 | 57,5 | 16,585 | 4,762 | 1,261 |
| | $F_л$ = 30,25 | - | 50,0 | - | 6,967 | 3,170 |
| 20 | $F_{вн}$ = 49,00 | 4,5 | 50,0 | 0,943 | 5,900 | 5,782 |
| | $F_н$ = 17,65 | 100,0 | 60,0 | 17,668 | 5,103 | 1,801 |
| | $F_л$ = 30,25 | - | 50,0 | - | 7,130 | 4,315 |

Характеристика радиатора $P_p' = f(\Delta t_p)$ представлена на черт.28.

Из графика видно, что при мощности рассеяния $P_p'$ = 8 Вт радиатор имеет перегрев $\Delta t_p$ = 15°С.

Температура перехода транзистора определяется из формулы ( I ).

Из справочного приложения 2 определяется тепловое сопротивление "переход-теплоотвод":

$$R_{пт} = 2\ °С/Вт.$$

Электроизоляционная прокладка ставится под транзистор с меньшей мощностью.

Из справочного приложения 3 определяем тепловое сопротивление электроизоляционной прокладки $R_к' = 1°C/Вт$

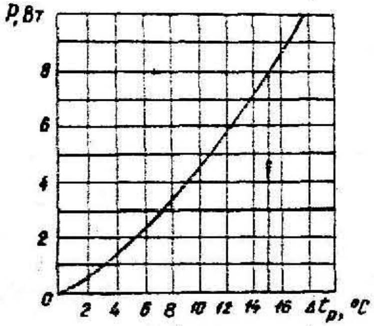
Тепловое сопротивление "переход-теплоотвод" при наличии электроизоляционной прокладки равно

$$R_{пт} = R_{пт} + R_к' = 2+1 = 3\ °C/Вт.$$

Для транзистора П217 мощностью рассеяния $P = 5$ Вт температура перехода равна

$$t_{пер} = t_c + \Delta t_p + P \cdot R_{пт} = 50+15+10 = 75\ °C.$$

Мощность рассеяния радиатора
в зависимости от его перегрева




Черт.28

Для транзистора П217 мощностью рассеяния $P = 3$ Вт температура перехода равна

$$t_{пер} = t_c + \Delta t_p + P \cdot R_{пт}' = 50+15+9 = 74\ °C.$$

## 11.2. Пример 2. Расчет штыревого радиатора при вынужденной конвекции

На одностороннем радиаторе со стороны, где нет штырей, установлен транзистор мощностью рассеяния $P = 15$ Вт.

Температура окружающей среды $t_c = 50°C$.

Габаритные размеры радиатора: высота $L = 63$ мм;
ширина $B = 42$ мм;
глубина $H = 25$ мм.

Высота штыря $H_1 = 20$ мм.

Количество штырей $N = 54$ шт.





Площадь пластины $F = 5,123 \cdot 10^{-3}$ м$^2$.

Шаг радиатора $S = 7$ мм.

Диаметр штыря $d = 2$ мм.

Скорость воздуха, подходящего к радиатору, $W = 1$ м/с.

Определить температуру на переходе транзистора 2Т803

Решение.

1. Задаемся произвольными значениями $P_{шт}' = 5, 10, 12$ Вт и рассчитываем:

перегрев воздуха в решетке радиатора по формуле (15);

среднюю температуру воздуха в решетке радиатора;

критерий Рейнольдса;

критерий Нуссельта по формуле (28);

коэффициент теплоотдачи по формуле (21);

средний перегрев штырей по отношению к подходящему воздуху из формулы (18);

комплекс $mH_1$;

эффективность штыря по черт.14;

средний перегрев радиатора по отношению к окружающей среде из формулы (20).

Результаты расчетов сведены в табл.5.

Таблица 5

| Формулы | Мощность рассеяния $P_{шт}$, Вт | | |
|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 12 |
| $\Delta t_в = \frac{P_{шт}}{c_p \rho_c W_p F_ж}$, °C | 5,46 | 10,92 | 13,10 |
| $t_f = t_c + \frac{\Delta t_в}{2}$, °C | 52,73 | 55,46 | 56,55 |
| $Re_f = \frac{W_p d}{\nu}$ | 153,00 | 151,00 | 150,00 |
| $Nu_f = 0.21 Re_f^{0,65}$ | 5,52 | 5,47 | 5,45 |
| $\alpha = \frac{Nu_f \lambda}{d}$, Вт/(м$^2$·°C) | 78,60 | 78,40 | 78,30 |
| $\Delta t_{шт-в} = \frac{P_{шт}}{\alpha F_{шт}}$, °C | 9,36 | 18,81 | 22,60 |
| $mH_1 = 2\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda d}} \cdot H_1$, м | 0,61 | 0,61 | 0,61 |
| $\eta$ из черт. 14 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| $\Delta t_p = \frac{\Delta t_{шт-в}}{\eta} + \frac{\Delta t_в}{2}$, °C | 13,18 | 26,46 | 31,86 |

2. Теплосъем с пластины радиатора за счет конвекции определяется следующим образом:

рассчитываем критерий Рейнольдса;

рассчитываем критерий Нуссельта;

рассчитываем коэффициент теплоотдачи по формуле (II).

Результаты расчета сведены в табл.6.

Таблица 6

| | |
|---|---|
| $Re = \frac{WL}{\nu}$ | 35I0,0 |
| $Nu = 0{,}66\,Re^{0{,}65}$ | 39,0 |
| $\alpha = \frac{Nu\,\lambda}{L}$, Вт/(м²·°С) | I7,5 |

3. Для полученных значений перегрева радиатора рассчитывается теплосъем с пластины по формуле

$$P' = \alpha \cdot F_{пл}\, \Delta t_p\, \theta.$$

Результаты расчета сведены в табл.7.

Таблица 7

| $\Delta t_p$, °С | I3,80 | 26,46 | 3I,86 |
|---|---|---|---|
| $P'$, Вт | I,24 | 2,38 | 2,86 |

4. Теплосъем с радиатора излучением определяется по формуле

$$P'_л = \alpha_л\, F_л\, \Delta t_p,$$

где $\alpha_л$ определяется по графику справочного приложения 5.

Результаты расчета сведены в табл.8.

Таблица 8

| $\Delta t_p$, °С | $\alpha_л$, Вт/(м²·°С) | $P'_л$, Вт |
|---|---|---|
| I3,I8 | 6,92 | 0,96 |
| 26,45 | 7,34 | 2,05 |
| 3I,86 | 7,54 | 2,54 |

Суммарный теплосъем с радиатора определяется из зависимости

$$P'_p = P'_{шт} + P'_{пл} + P'_л.$$



Результаты расчета сведены в табл.9.

Таблица 9

| $\Delta t_p$, °С | $P'_{шт}$, Вт | $P'_{пл}$, Вт | $P'_л$, Вт | $P'_p$, Вт |
|---|---|---|---|---|
| I3,I8 | 5 | I,24 | 0,96 | 7,20 |
| 26,45 | I0 | 2,38 | 2,05 | I4,43 |
| 3I,96 | I2 | 2,86 | 2,54 | I7,34 |

5. По тепловой характеристике определяется перегрев радиатора при мощности рассеяния $P$ = I5 Вт, $\Delta t_p$ =27,5°С.

6. Температура перехода транзистора определяется по формуле

$$t_{пер} = t_c + \Delta t_p + PR_{пт} = 50 + 27{,}5 + 15 \cdot 2{,}1 = 109\ °C.$$

## I2. ПРИМЕРЫ ВЫБОРА РАДИАТОРОВ ПО ГРАФИКАМ

I2.I. Пример I.

Определить температуру перехода транзистора 2Т903 мощностью рассеяния $P$ = 6 Вт, установленного на ребристом радиаторе с габаритными размерами: высота $L$ = 80 мм;
ширина $B$ = 72 мм;
глубина $H$ = 25 мм;
высота ребра $H_1$ = 20 мм
без электроизоляционной прокладки.

Решение.

По черт.I8 находим коэффициенты $K_H$ = I и $K_L$ = I.

Определяем комплекс

$$\frac{P}{F K_H K_L} = \frac{6}{0{,}08 \cdot 0{,}072 \cdot 1 \cdot 1} = 1040\ \frac{Вт}{м^2}.$$

По черт.I7 для одностороннего радиатора находим перегрев радиатора $\Delta t_p$ = I8°С.

По формуле (3) определяем температуру перехода транзистора 2Т903 в данных условиях эксплуатации:

$$t_{пер} = t_c + \Delta t_p + P \cdot R_{пт} = 50 + 18 + 6 \cdot 3{,}7 = 90{,}2\ °C.$$

I2.2. Пример 2.

Подобрать односторонний штыревой радиатор с минимальными габаритными размерами для охлаждения транзистора 2Т908 мощностью рассеяния $P$ =I2 Вт, размещенного в блоке с вынужденным охлаждением (скорость охлаждающего воздуха $W$ =I м/с).

Перегрев радиатора $\Delta t_p$ не должен превышать I0°C.

Температура окружающей среды $t_c = 50°C$.

Решение.

По черт.25 для одностороннего радиатора при скорости воздуха $W = I$ м/с и перегреве радиатора $\Delta t_p = 10°C$ находим комплекс

$$\frac{P}{F K_H K_L} = 2500 \frac{Вт}{м^2}.$$

По конструктивным соображениям выбираем радиатор с габаритными размерами: $L = 100$ мм; $H = 17,5$ мм; $H_1 = 12.5$ мм; $S = 5$ мм.

По черт.26 при $H_1 = 12,5$ мм и $L = 100$ мм для одностороннего радиатора находим коэффициенты $K_H = 0,72$ и $K_L = 0,75$.

Из комплекса $\frac{P}{F K_H K_L} = 2500 \frac{Вт}{м^2}$ определяем площадь основания радиатора $F = \frac{P}{2500 K_H K_L} = \frac{12}{2500 \cdot 0,72 \cdot 0,75} = 0,0089 м^2$ и ширину радиатора $B = \frac{F}{L} = \frac{0,089}{0,1} = 0,089 м$.

На основании проведенного расчета принимаем следующие габаритные размеры радиатора: $L = 100$ мм; $B = 90$ мм; $H = 17,5$ мм; $H_1 = 12,5$ мм.

I2.3. Пример 3.

Определить максимальный теплосъем с пластинчатого радиатора с габаритными размерами $L = 100$ мм; $B = 50$ мм; $h = 2$ мм при температуре окружающей среды 60°C для следующих условий эксплуатации:

при естественной конвекции;

при вынужденной конвекции со скоростью охлаждающего воздуха $W = I$ м/с.

Перегрев радиатора относительно окружающей среды не должен превышать $\Delta t_p = 20°C$.

Решение.

I. Естественная конвекция.

По черт.I5 для $\Delta t_p = 20°C$, $L = 100$ мм находим

$$\frac{P}{F} = 243 \frac{Вт}{м^2}.$$

Определяем мощность рассеяния с пластины:

$$P = F \cdot 243 = 0,1 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 243 = 2,43 \text{ Вт}.$$

С учетом поправки на температуру окружающей среды (справочное приложение 7) мощность рассеяния с пластины равна:

$$P = 2,43 \cdot 1,04 = 2,53 \text{ Вт}.$$

2. Вынужденная конвекция.

Для $W = I$ м/с и $L = 100$ мм по черт.I5 находим численное значение комплекса: $\frac{P}{F_{осн} \Delta t} = 21 \frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$.



Мощность рассеяния с пластины

$P_{пл} = 21 \cdot \Delta t F_{осн} = 21 \cdot 20 \cdot 0,1 \cdot 0,05 \cdot 2 = 4,2$ Вт.

С учетом поправки на температуру окружающей среды

$P_{пл} = 4,2 \cdot 1,04 = 4,37$ Вт.

## I3. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$P'$ – теплосъем, Вт;
$P$ – мощность рассеяния ППП, Вт;
$P''$ – давление, мм рт.ст.;
$R$ – тепловое сопротивление, °C/Вт;
$t$ – температура, °C;
$t_c$ – температура окружающей среды, °C;
$t_f$ – средняя температура воздуха, °C;
$t_m$ – средняя температура между стенкой и воздухом, °C;
$T$ – абсолютная температура, К;
$\Delta t_B$ – перегрев воздуха в радиаторе по отношению к окружающей среде, °C;
$\Delta t_{шт-в}$ – перегрев штыря по отношению к подходящему воздуху, °C;
$\Delta t$ – разность температур, °C;
$V$ – объемный расход воздуха, м³/с;
$W$ – скорость воздуха, м/с;
$F$ – площадь, м²;
$R'_k$ – тепловое сопротивление прокладки, °C/Вт;
$R'_{пт}$ – тепловое сопротивление переход–теплоотвод при наличии прокладки, °C/Вт;
$f$ – площадь поперечного сечения радиатора, м²;
$F_ж$ – площадь живого сечения, м²;
$L$ – высота радиатора, определяющий размер, мм, м;
$B$ – ширина радиатора, мм, м;
$H$ – глубина радиатора, мм, м;
$H_1$ – высота ребра (штыря) радиатора, мм, м;
$h$ – толщина основания радиатора, мм, м;
$b$ – толщина ребра радиатора, мм, м;
$n$ – число ребер ребристого радиатора;
$N_1$ – число штырей по высоте радиатора (по направлению давления воздуха);
$N_2$ – число штырей по ширине радиатора;
$S$ – шаг радиатора, мм, м;
$U$ – периметр, м;
$d$ – диаметр штыря, эквивалентный диаметр, мм, м;

$\delta$ – половина межреберного расстояния, мм, м;
$\Delta t_{шт}$ – перегрев штыря относительно окружающей среды, °С;
$x, y$ – координаты;
$\Delta H$ – гравитационный напор, Н/м$^2$;
$\Delta P$ – аэродинамическое сопротивление, Н/м$^2$;
$\Delta P_{1,2,...,f}$ – падение давления;
$g$ – ускорение силы тяжести, м/с$^2$;
$\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·°С);
$\alpha$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м$^2$·°С);
$C_p$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);
$\rho$ – удельный вес воздуха, кг/м$^3$;
$\eta$ – эффективность ребра (штыря);
$\mu$ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
$\nu$ – коэффициент кинематической вязкости, м$^2$/с;
$G$ – вес радиатора, кг;
$\varepsilon$ – степень черноты т ла;
$C_o$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;
$\theta$ – коэффициент неравномерности температурного поля;
$\bar{\theta}$ – усредненный коэффициент неравномерности температурного поля;
$K_H, K_L$ – поправки на высоту ребра и высоту радиатора;
$\beta = \frac{1}{T}$ – коэффициент объемного расширения воздуха, I/К;
$a$ – коэффициент температуропроводности, м$^2$/ч.

Безразмерные комплексы и критерии подобия:

$Re = \frac{Wd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;
$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля;
$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;
$Gr = \frac{gd^3}{\nu^2}\beta\Delta t$ – критерий Грасгофа;
$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ – критерий Био.

Индексы:

пер – переход
с – среда
р – радиатор
к – контакт
пк – переход-корпус
тр – транзистор
пт – переход-теплоотвод
доп – допустимый (ая)



пр – приведенный (ая)
вн – внутренний (ая)
н – наружный
в – воздух
пл – пластина
шт – штырь
л – лучистый (ая)
экв – эквивалентный (ая)
осн – основание
$m$ – параметр по средней температуре между стенкой и воздухом
$f$ – параметр по средней температуре воздуха
$\delta$ – половина межреберного расстояния

ПРИЛОЖЕНИЕ I
Справочное

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО РАДИАТОРУ

Распределение температуры по радиатору позволяет более точно рассчитать теплосъем с радиатора и определить температуру в каждой точке.

Распределение температуры по радиатору с учетом движения воздуха в направлении вертикальной оси $X$ описывается системой дифференциальных уравнений в безразмерных параметрах:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \theta_в}{\partial x} = K_2(\theta_р - \theta_в) \\ \dfrac{\partial^2 \theta_р}{\partial x^2} + \sigma^2 \dfrac{\partial^2 \theta_р}{\partial y^2} = K_1(\theta_р - \theta_в) + K_3 \theta_р , \end{cases} \qquad (1)$$

где $K_1 = \dfrac{\alpha_{пр} L^2}{\lambda h}$ ; $K_2 = \dfrac{\alpha_{вн} U L}{\rho C_p W f}$ ; $K_3 = \dfrac{\alpha_л L^2}{\lambda h}$ ; (2)

для ребристых радиаторов

$$\alpha_{пр} = \frac{2\alpha_{вн}(n-1)(H_1+\delta)}{B} ; \qquad (3)$$

$$\alpha_{вн} U = 2\alpha_{вн}(n-1)(H_1+\delta) ; \qquad (4)$$

для штыревых радиаторов

$$\alpha_{пр} = \frac{\pi d H_1 N_1 N_2 \alpha_{шт} \eta_{шт} + 2\alpha_{пл} F_{пл}}{B \cdot L} ; \qquad (5)$$

$$\alpha_{вн} U = \frac{\pi d H_1 N_1 N_2 \alpha_{шт} \eta_{шт} + \alpha_{пл} F_{пл}}{L} . \qquad (6)$$

Формула приведения:

$$y = \frac{Y}{B} ; \quad x = \frac{X}{L} ; \quad \theta_р = \frac{t_р - t_c}{t_{p max} - t_c} ; \quad \theta_в = \frac{t_в - t_c}{t_{p max} - t_c} . \qquad (7)$$

Соотношение между высотой и шириной радиатора

$$\sigma = \frac{L}{B} . \qquad (8)$$



В ребристых радиаторах для учета передачи тепла по ребру вводится поправочный коэффициент $\sigma_1$ :

для односторонних ребристых радиаторов

$$\sigma_1 = 1 + \frac{H_1 b n}{B h} ; \qquad (9)$$

для двусторонних ребристых радиаторов

$$\sigma_1 = 1 + 2\frac{H_1 b n}{B h} . \qquad (10)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} &\theta_в = 0 ; && x = 0 ; && 0 \le y \le 1 ; \\ &\frac{\partial \theta_р}{\partial x} = Bi\,\theta_р ; && x = 0 ; && 0 \le y \le 1 ; \\ &\frac{\partial \theta_р}{\partial x} = -Bi\,\theta_р ; && x = 1 ; && 0 \le y \le 1 ; \\ &\frac{\partial \theta_р}{\partial y} = Bi\,\theta_р ; && y = 0 ; && 0 \le x \le 1 ; \\ &\frac{\partial \theta_р}{\partial y} = -Bi\,\theta_р ; && y = 1 ; && 0 \le x \le 1 ; \\ &\theta_р = 1 ; && \frac{1}{2} - r_1 \le x \le \frac{1}{2} + r_1 ; && \frac{1}{2} - r_2 \le y \le \frac{1}{2} + r_2 . \end{aligned} \qquad (11)$$

Система дифференциальных уравнений (I) сводится к одному уравнению. Для этого из первого уравнения находится $\theta_р$ и подставляется во второе уравнение:

$$\theta_р = \theta_в + \frac{1}{K_2} \frac{\partial \theta_в}{\partial x} . \qquad (12)$$

Второе уравнение, после подстановки в него выражения (12), принимает вид

$$\sigma^2 \frac{\partial^2 \theta_в}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_в}{\partial x^2} + \frac{\sigma^2}{K_2} \frac{\partial^3 \theta_в}{\partial x \partial y^2} + \frac{1}{K_2} \frac{\partial^3 \theta_в}{\partial x^3} = \frac{K_1}{K_2} \frac{\partial \theta_в}{\partial x} + K_3 \theta_в + \frac{K_3}{K_2} \frac{\partial \theta_в}{\partial x}$$

или

$$\sigma^2 \frac{\partial^2 \theta_в}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_в}{\partial x^2} + \frac{\sigma^2}{K_2} \frac{\partial^3 \theta_в}{\partial x \partial y^2} + \frac{1}{K_2} \frac{\partial^3 \theta_в}{\partial x^3} = \frac{K_1 + K_3}{K_2} \frac{\partial \theta_в}{\partial x} + K_3 \theta_в . \qquad (13)$$

Дифференциальное уравнение (13) решается относительно $\theta_в$ методом разделения переменных. Для этого $\theta_в$ представляется как

$$\theta_в = X(x)\,Y(y) . \qquad (14)$$

Уравнение (I3), после подстановки в него выражения (I4), будет иметь вид

$$\sigma^2 XY'' + X''Y + \frac{\sigma^2}{K_2}X'Y'' + \frac{1}{K_3}X'''Y = \frac{K_1+K_3}{K_2}X'Y + K_3XY. \qquad (I5)$$

Далее, если предположить, что $\theta_б$ в направлении $y$ изменяется по закону

$$\frac{\partial^2\theta_б}{\partial y^2} = \omega^2\theta_в ,$$

где $\theta_б$ выражается из уравнения (I4), то тогда

$$Y'' = \omega^2 Y. \qquad (I6)$$

Здесь $\omega$ - произвольное постоянное число.

Преобразованное уравнение (I5) с использованием равенства (I6) после сокращения будет уравнением относительно одной неизвестной функции $X$ :

$$\left.\begin{aligned} &\sigma^2\omega^2X + X'' + \frac{\sigma^2}{K_2}\omega^2X' + \frac{1}{K_2}X''' = \frac{K_1+K_3}{K_2}X' + K_3X \\ &X''' + K_2X'' + (\sigma^2\omega^2 - K_1 - K_3)X' + (\sigma^2\omega^2 - K_3)X = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (I7)$$

Уравнение (I7) является однородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Для нахождения общего решения необходимо найти корни $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ алгебраического уравнения

$$\delta^3 + K_2\delta^2 + (\sigma^2\omega^2 - K_1 - K_3)\delta + (\sigma^2\omega^2 - K_3) = 0. \qquad (I8)$$

Каждому корню $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ соответствуют частные решения:

$$e^{\delta_1 x},\ e^{\delta_2 x},\ e^{\delta_3 x}.$$

Линейная комбинация этих решений является общим решением однородного уравнения (I7):

$$X(x) = C_1e^{\delta_1 x} + C_2e^{\delta_2 x} + C_3e^{\delta_3 x}, \qquad (I9)$$

где $C_1, C_2, C_3$ - произвольные постоянные.

Чтобы корни кубического уравнения (I8) были всегда действительными, выбор произвольной величины $\omega$ ограничивается неравенством

$$\omega^2\sigma^2 \leq K_3. \qquad (20)$$



Для нахождения общего решения однородного уравнения (I6) необходимо найти корни алгебраического уравнения

$$\delta^2 = \omega^2,$$

т.е. $\delta_1 = \omega,\ \delta_2 = -\omega,$

и общее решение уравнения (I6) принимает вид

$$Y = D_1e^{\omega y} + D_2e^{-\omega y}, \qquad (21)$$

где $D_1, D_2$ - произвольные постоянные.

В результате подстановки решений (I9) и (21) в выражение (I4)

$$\theta_в = (C_1e^{\delta_1 x} + C_2e^{\delta_2 x} + C_3e^{\delta_3 x})(D_1e^{\omega y} + D_2e^{-\omega y}). \qquad (22)$$

Далее при подстановке выражения (22) в уравнение (I2)

$$\theta_p = \left[C_1e^{\delta_1 x}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2e^{\delta_2 x}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3e^{\delta_3 x}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right)\right](D_1e^{\omega y} + D_2e^{-\omega y}). \qquad (23)$$

Выражение в квадратных скобках обозначается через $\varphi(x)$, тогда

$$\theta_p = \varphi(x)\,Y(y). \qquad (24)$$

Произвольные постоянные $C_1, C_2, C_3, D_1, D_2$ определяются из граничных условий.

Учитывая, что

$$\left.\begin{aligned}\theta_в &= X(x)\,Y(y) \\ \theta_p &= \varphi(x)\,Y(y),\end{aligned}\right\}$$

граничные условия (Г.У.) принимают вид:

| | | |
|---|---|---|
| 1. $X(0) = 0$ | $x = 0;$ | |
| 2. $\varphi'(0) = Bi\,\varphi(0)$ | $x = 0;$ | |
| 3. $\varphi'(1) = -Bi\,\varphi(1)$ | $x = 1;$ | |
| 4. $Y'(0) = Bi\,Y(0)$ | $y = 0;$ | (25) |
| 5. $Y'(1) = -Bi\,Y(1)$ | $y = 1;$ | |
| 6. $\varphi(x) = 1$ | $\frac{1}{2} - r_1 \leq x \leq \frac{1}{2} + r_1;$ | |
| $Y(y) = 1$ | $\frac{1}{2} - r_2 \leq y \leq \frac{1}{2} + r_2.$ | |

Обозначение функций:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\varphi_1(x)$ | значение функции | при | $0 \leq x \leq \frac{1}{2} - r_1;$ |
| $\varphi_2(x)$ | то же | при | $\frac{1}{2} + r_1 \leq x \leq 1;$ |
| $\varphi_3(x)$ | - " - | при | $\frac{1}{2} - r_1 < x < \frac{1}{2} + r_1;$ |

$Y_1(y)$ значение функции $y$ при $0 \le y \le \frac{1}{2} - r_1$;

$Y_2(y)$ то же при $\frac{1}{2} + r_1 \le y \le 1$;

$Y_3 = 1$ – " – при $\frac{1}{2} - r_2 < y < \frac{1}{2} + r_2$.

Тогда:

$$\Phi_1(x) = C_1' e^{\delta_1 x}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2' e^{\delta_2 x}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3' e^{\delta_3 x}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right);$$

$$\Phi_2(x) = C_1'' e^{\delta_1 x}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'' e^{\delta_2 x}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'' e^{\delta_3 x}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right);$$

$$Y_1(y) = D_1' e^{\omega y} + D_2' e^{-\omega y};$$

$$Y_2(y) = D_1'' e^{\omega y} + D_2'' e^{-\omega y};$$

$$X_1(x) = C_1' e^{\delta_1 x} + C_2' e^{\delta_2 x} + C_3' e^{\delta_3 x} \quad при \ 0 \le x \le \frac{1}{2} - r_1;$$

$$X_2(x) = C_1'' e^{\delta_1 x} + C_2'' e^{\delta_2 x} + C_3'' e^{\delta_3 x} \quad при \ \frac{1}{2} + r_1 \le x \le 1.$$

$X_3(x)$ – значение функции при $\frac{1}{2} - r_1 < x < \frac{1}{2} + r_1$ удовлетворяет уравнению $X_3 + \frac{1}{K_2} X_3' = 1$,

решение которого $X_3 = E e^{-K_2 x} + 1$.

Здесь $E$ – произвольная постоянная, определяемая, например, из условия $X_1\left(\frac{1}{2} - r_1\right) = X_3\left(\frac{1}{2} + r_1\right)$,

т.е. $X_1\left(\frac{1}{2} - r_1\right) = E e^{-K_2\left(\frac{1}{2} - r_1\right)} + 1$,

откуда $E = \dfrac{X_1\left(\frac{1}{2} - r_1\right) - 1}{e^{-K_2\left(\frac{1}{2} - r_1\right)}}$.

Следовательно, $X_3(x) = \dfrac{X_1\left(\frac{1}{2} - r_1\right) - 1}{e^{-K_2\left(\frac{1}{2} - r_1\right)}} e^{-K_2 x} + 1$ при $\frac{1}{2} - r_1 < x < \frac{1}{2} + r_1$.

$C_1', C_2', C_3', C_1'', C_2'', C_3'', D_1', D_2', D_1'', D_2''$ – произвольные постоянные, определяемые из преобразованных Г.У. в соответствии с разбиением интервалов изменения переменных $X$ и $Y$ на 3 интервала:

$$\left[0, \frac{1}{2} - r_1\right], \ \left(\frac{1}{2} - r_1, \frac{1}{2} + r_1\right);$$

$$\left[\frac{1}{2} + r_1, 1\right];$$

$$\left[0, \frac{1}{2} - r_2\right], \ \left(\frac{1}{2} - r_2, \frac{1}{2} + r_2\right), \ \left[\frac{1}{2} + r_2, 1\right].$$

Уравнения для определения произвольных постоянных $C_1', C_2', C_3'$



будут следующими:

из Г.У. 1 $C_1' + C_2' + C_3' = 0$;

$$\text{из Г.У. 2} \quad C_1'\delta_1\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'\delta_2\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'\delta_3\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right) = Bi\left[C_1'\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right)\right]; \quad (26)$$

$$\text{из Г.У. 6} \quad C_1' e^{\delta_1\left(\frac{1}{2} - r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2' e^{\delta_2\left(\frac{1}{2} - r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3' e^{\delta_3\left(\frac{1}{2} - r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right) = 1.$$

Уравнения для постоянных $C_1'', C_2'', C_3''$ определяются из:

граничного условия 3

$$C_1'' e^{\delta_1}\delta_1\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'' e^{\delta_2}\delta_2\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'' e^{\delta_3}\delta_3\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right) = \quad (27)$$

$$= -Bi\left[C_1' e^{\delta_1}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'' e^{\delta_2}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'' e^{\delta_3}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right)\right],$$

граничного условия 6

$$C_1'' e^{\delta_1\left(\frac{1}{2} + r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_1}{K_2}\right) + C_2'' e^{\delta_2\left(\frac{1}{2} + r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_2}{K_2}\right) + C_3'' e^{\delta_3\left(\frac{1}{2} + r_1\right)}\left(1+\frac{\delta_3}{K_2}\right) = 1$$

и соотношения $X_2\left(\frac{1}{2} + r_1\right) = X_3\left(\frac{1}{2} + r_1\right)$, которое равно

$$C_1'' e^{\delta_1\left(\frac{1}{2} + r_1\right)} + C_2'' e^{\delta_2\left(\frac{1}{2} + r_1\right)} + C_3'' e^{\delta_3\left(\frac{1}{2} + r_1\right)} = X_3\left(\frac{1}{2} + r_1\right).$$

Уравнения для $D_1', D_2', D_1'', D_2''$ определяются из:

граничного условия 4

$$\omega(D_1' - D_2') = Bi(D_1' + D_2')$$

граничного условия 6

$$D_1' e^{\omega\left(\frac{1}{2} - r_2\right)} + D_2' e^{-\omega\left(\frac{1}{2} - r_2\right)} = 1 \quad (28)$$

$$D_1'' e^{\omega\left(\frac{1}{2} + r_2\right)} + D_2'' e^{-\omega\left(\frac{1}{2} + r_2\right)} = 1$$

граничного условия 5

$$\omega\left(D_1'' e^{\omega} - D_2'' e^{-\omega}\right) = -Bi\left(D_1'' e^{\omega} + D_2'' e^{-\omega}\right). \quad (29)$$

После упрощения и решения систем линейных уравнений (26)-(29) однозначно определятся: $C_1', C_2', C_3', C_1'', C_2'', C_3'', D_1', D_2', D_1'', D_2''$, а следовательно и

$$X_1(x), \ X_2(x), \ \Phi_1(x), \ \Phi_2(x), \ Y_1(y), \ Y_2(y).$$

Решения $\theta_B$ и $\theta_p$ формируются согласно схеме:

| | $0 \ldots \frac{l}{2}-r_1$ | $\frac{l}{2}-r_1 \ldots \frac{l}{2}+r_1$ | $\frac{l}{2}+r_1 \ldots X$ |
|---|---|---|---|
| $\frac{l}{2}+r_2 \ldots Y$ | $\theta_B = X_1 Y_2$<br>$\theta_p = \Phi_1 Y_2$ | $\theta_B = X_3 Y_2$<br>$\theta_p = \Phi_3 Y_2$ | $\theta_B = X_2 Y_2$<br>$\theta_p = \Phi_2 Y_2$ |
| $\frac{l}{2}-r_2 \ldots \frac{l}{2}+r_2$ | $\theta_B = X_1 Y_3$<br>$\theta_p = \Phi_1 Y_3$ | $\theta_B = X_3 Y_3$<br>$\theta_p = \Phi_3 Y_3$ | $\theta_B = X_2 Y_3$<br>$\theta_p = \Phi_2 Y_3$ |
| $0 \ldots \frac{l}{2}-r_2$ | $\theta_B = X_1 Y_1$<br>$\theta_p = \Phi_1 Y_1$ | $\theta_B = X_3 Y_1$<br>$\theta_p = \Phi_3 Y_1$ | $\theta_B = X_2 Y_1$<br>$\theta_p = \Phi_2 Y_1$ |

Решение кубического уравнения (18), систем линейных алгебраических уравнений (26)-(29), вычисление коэффициентов и формирование решения согласно схеме были проведены на ЭЦВМ "РАЗДАН-3".

Данное решение выполнено для одного полупроводникового прибора, расположенного в центре теплоотвода.

Для транзистора, расположенного при других координатах, изменяется граничное условие 6.



ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ППП

| Тип ППП | Предельно допустимая температура перехода ППП $t_{пер}$, °C | Предельно допустимая температура корпуса ППП $t_к$, °C | Тепловое сопротивление между переходом ППП и теплоотводом $R_{пт}$, °C/Вт | Тепловое сопротивление между корпусом ППП и теплоотводом $R_{пк}$, °C/Вт |
|---|---|---|---|---|
| П303, П303А, П306, П306А, П701, П701А, П302, П304, П701Б | 150 | - | 10,5 | 0,5 |
| 2Т602А, 2Т602Б | 150 | - | 46,2 | 1,2 |
| 2Т606А | 150 | - | 45,0 | 1,0 |
| 2Т904А | 150 | 125 | 17,0 | 1,0 |
| 2Т808А, 2Т908А, 2Т803А | 150 | - | 2,4 | 0,4 |
| 2Т803 | 150 | - | 2,1 | 0,4 |
| П702, П702А, 2Т903А, 2Т903Б | 150 | - | 3,7 | 0,4 |
| 2Т907 | 150 | - | 8,5 | 1,0 |
| 2Т909А | 160 | - | 6,5 | 1,5 |
| 2Т909Б | 160 | - | 4,0 | 1,5 |
| 2Т911 | 150 | - | 34,5 | 1,5 |
| П210А, П210Б, П210В, П210Г | 85 | - | 1,25 | 0,25 |
| П601АИ, П601БИ, П601И, П602И, П602АИ, П605, П606, П606А, П607, П607А, П608А, П608Б, П609, П602А, П609Б | 85 | - | 15,50 | 0,50 |

Продолжение

| Тип ППП | Предельно допустимая температура перехода ППП $t_{пер}$, °C | Предельно допустимая температура корпуса ППП $t_к$, °C | Тепловое сопротивление между переходом ППП и теплоотводом $R_{пт}$, °C/Вт | Тепловое сопротивление между корпусом ППП и теплоотводом $R_{пк}$, °C/Вт |
|---|---|---|---|---|
| П2I3 | 85 | - | 3,50 | 0,50 |
| П2I3А,П2I5Б,П2I4А,П2I4Б,П2I4Г,П2I4В,П2I5,П2I4 | 85 | - | 4,00 | 0,50 |
| П2I6,П2I6А,П2I6Д,П2I7,П2I7А,П2I7Б | 85 | - | 2,00 | 0,50 |
| П2I6Б,П2I6В,П2I6Г,П2I7В,П2I7Г | 85 | - | 2,5 | 0,5 |
| IT806Д,IT806Б,IT806В | 85 | - | 2,4 | 0,4 |
| IT905А | 85 | - | 9,5 | 0,5 |
| IT403А,IT403Б,IT403Г,IT403Д,IT403Ж,IT403Е,IT403И | 85 | - | I5,0 | - |
| IT403В,IT403Е | 85 | - | I2,0 | - |
| IT90IА,IT90IБ | 75 | - | 2,9 | 0,4 |
| IT906А | 75 | - | 3,0 | 0,5 |
| 2Д204А,2Д204Б,2Д204В | - | I30 | - | I,2 |
| 2Д20IА,2Д20IБ,2Д20IВ,2Д20IГ,2Д203А,2Д203Б,2Д203В,2Д203Г,2Д203Д,Д2I5,Д2I5А,Д2I5Б,Д23IА,Д23IД,Д232А,Д232Б,Д233Б,Д234Б,Д233 | - | I30 | - | 0,77 |



Продолжение

| Тип ППП | Предельно допустимая температура перехода ППП $t_{пер}$, °C | Предельно допустимая температура корпуса ППП $t_к$, °C | Тепловое сопротивление между переходом ППП и теплоотводом $R_{пт}$, °C/Вт | Тепловое сопротивление между корпусом ППП и теплоотводом $R_{пк}$, °C/Вт |
|---|---|---|---|---|
| Д238А,Д238Б,Д238В,Д238Г,Д238Д,Д238Е | - | I00 | - | 0,25 |
| 2У20IА,2У20IБ,2У20IВ,2У20IГ,2У20IД,2У20IЕ,2У20IЖ,2У20IИ,2У20IК,2У20IЛ | - | II0 | - | 0,77 |
| Д235А,Д235Б,Д235В,Д235Г | - | I00 | - | 0,77 |
| 2У202Д,2У202Е,2У202К,2У202Л,2У202М,2У202Н,2У203А,2У203Б,2У203В,2У203Г,2У203Д,2У203Е,2У203Ж,2У203И | - | II0 | - | 0,33 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

## СРЕДНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОКЛАДОК

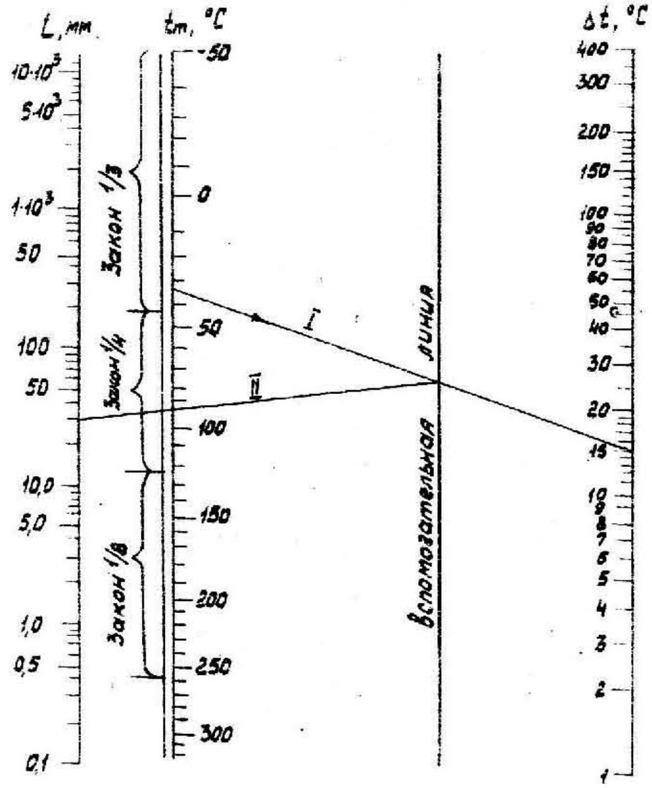
| Тип прокладки и покрытия | Толщина прокладки и покрытия, мм | Тепловое сопротивление прокладки при диаметре $R'_к$, °С/Вт | |
|---|---|---|---|
| | | более I9 мм | менее I9 мм |
| Слюда | 0,050 | 0,40 | 0,7 |
| Триацетатная пленка | 0,070 | I,00 | 2,0 |
| Окись бериллия | 2,000 | 0,30 | 0,5 |
| Глубокое изоляционное анодирование | 0,035-0,040 | 0,50-0,65 | I,2-I,5 |



ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Справочное

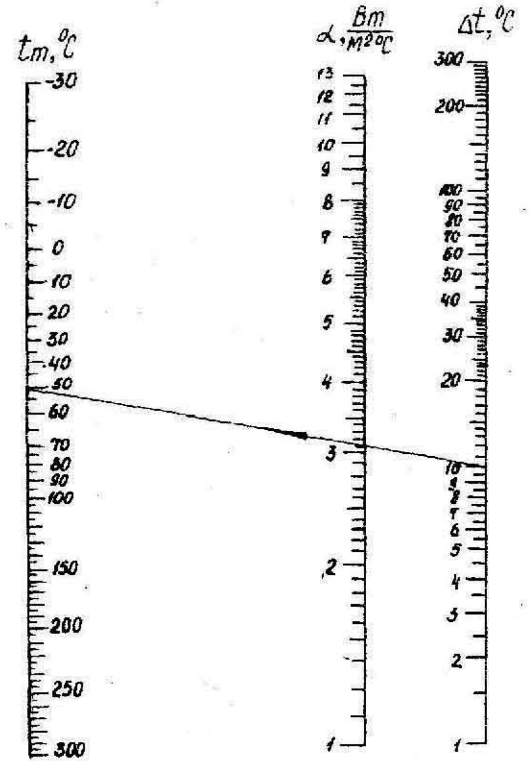
## НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Номограмма для определения закона теплоотдачи




Черт.I

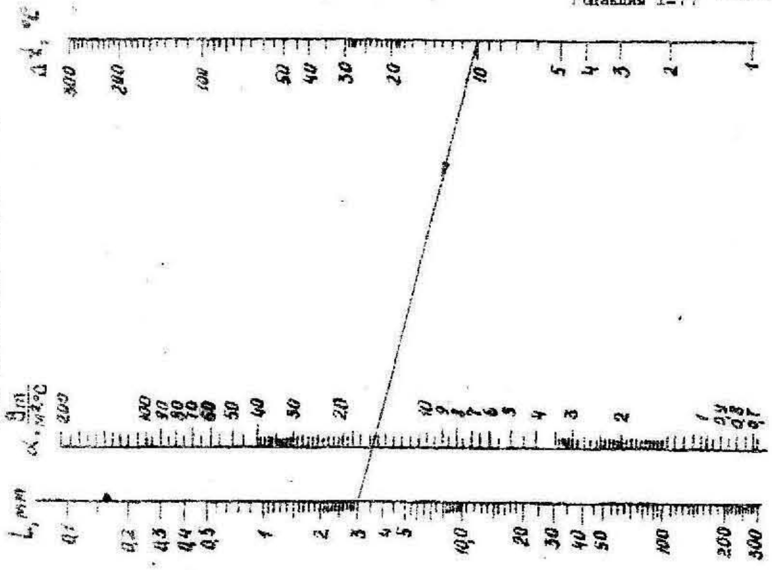
Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи
(естественная конвекция, закон I/3)




Черт.2

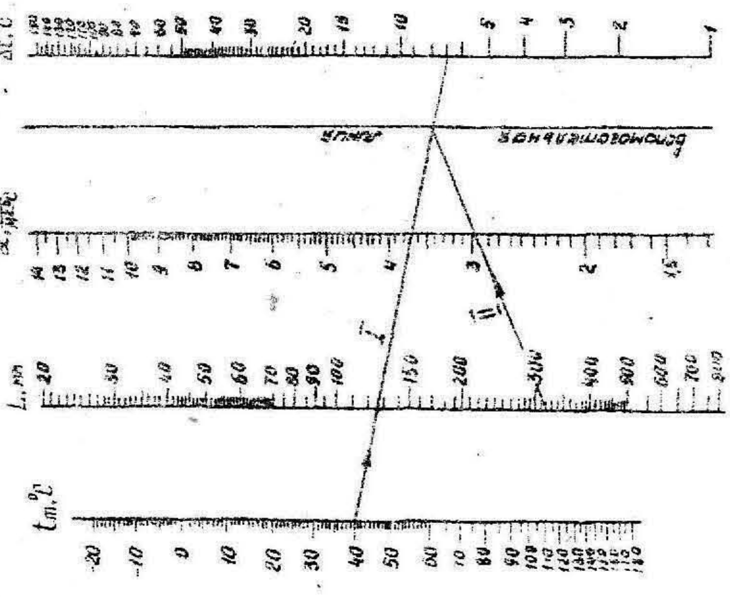


Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи
(естественная конвекция, закон 1/3)



Черт. 4

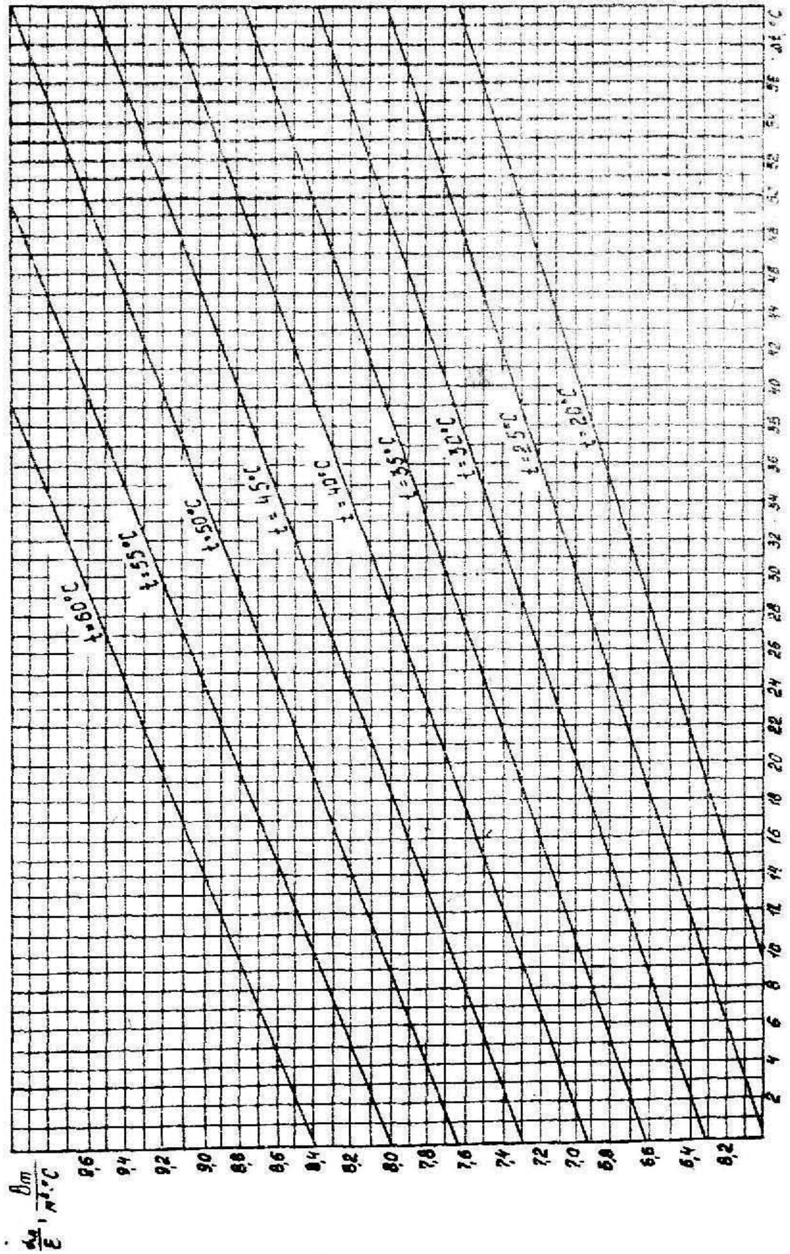
Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи
(естественная конвекция, закон 1/4)



Черт. 3

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Справочное

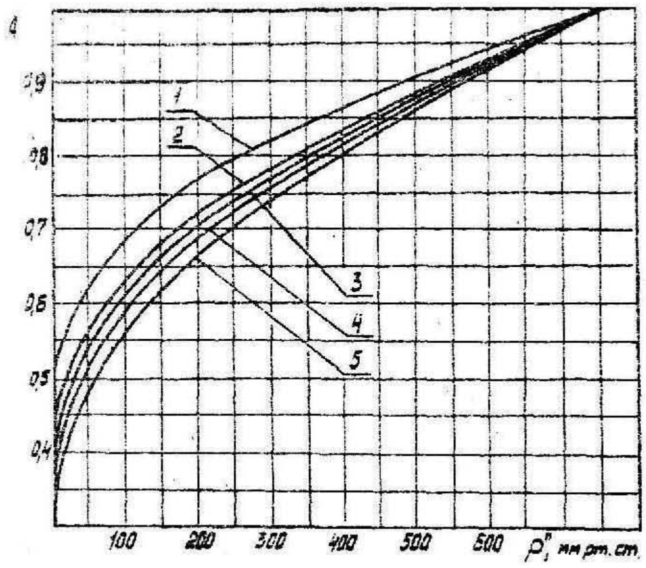
ЛУЧИСТЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ






ПРИЛОЖЕНИЕ 6
Справочное

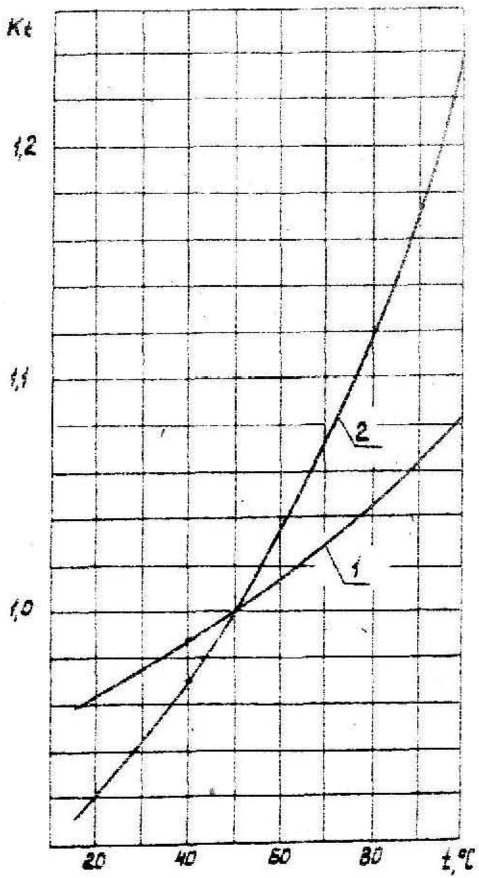
## ПОПРАВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ НА ДАВЛЕНИЕ




I - радиаторы пластинчатые;
2 - радиаторы штыревые односторонние;
3 - радиаторы штыревые двусторонние;
4 - радиаторы ребристые односторонние;
5 - радиаторы ребристые двусторонние

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Справочное

## ПОПРАВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ НА ТЕМПЕРАТУРУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ




I - радиаторы ребристые;
2 - радиаторы штыревые и пластинчатые



С О Д Е Р Ж А Н И Е